Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

IEE2273 — Laboratorio de Máquinas Eléctricas

Apuntes de Máquinas Eléctricas

Transformadores Trifásicos

Actualización de los profesores
David Watts C. y Juan Dixon

Digitalización a LaTeX el año 2014 por:
Rodrigo Henríquez Auba

Acerca de este documento

Este documento es el resultado del trabajo de distintas personas, cuyo aporte al documento final se describe a continuación:

La primera versión de este documento estuvo compuesta por seis publicaciones independientes, editadas por los señores Efraín Asenjo S., Carlos Donoso Z., Alain Hermosilla J., Nelson Morales O., Alfredo Muñoz R. y Jorge Romo L. entre los años 1981 y 1982 por la Oficina de Publicaciones Docentes del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile.

Posteriormente, durante el año 2000, el Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Pontificia Universidad Católica de Chile, señor David Watts C. trabajó en su digitalización y en la readecuación de sus contenidos para el curso IEE2272 Laboratorio de Máquinas Eléctricas, labor que desempeñó con la ayuda del ayudante Felipe Garcia.

Luego, durante el año 2001, gracias al concurso Fondo de Desarrollo de la Docencia FONDEDOC 2001, los profesores David Watts C. y Juan Dixon terminaron la actualización y readecuación de este documento., con la ayuda del ayudante Juan Francisco Araya y de algunos alumnos, ayudantes y profesores del curso.

Finalmente, en el año 2014, el alumno Rodrigo Henríquez Auba, trabajó en la digitalización a LaTeX de los documentos, junto a los profesores del ramo IEE2273 Laboratorio de Máquinas Eléctricas, don Mario Ricardo Saez S. y don Luis Vergara R.

Índice

Introducción 1

1. Generalidades 2

2. Concepto de polaridad 4
2.1. Polaridad . . . 4
2.2. Definiciones y normas . . . 4

3. Diagramas vectoriales de tensión 6
3.1. Introducción . . . 6
3.2. Grupo de conexión y desplazamiento angular . . . 6
3.3. Determinación del tipo de conexión . . . 7
3.4. Determinación experimental del diagrama fasor . . . 13
3.5. Conexiones trifásicas más usuales en transformadores . . . 15

4. Razón de Transformación 18
4.1. Consideraciones generales . . . 18

5. Propiedades de las principales conexiones trifásicas 19
5.1. Conexión Estrella – Estrella (Yy) . . . 19
5.1.1. Tensiones y corrientes . . . 19
5.1.2. Desequilibrios en la carga . . . 20
5.1.3. Armónicas de corriente, tensión y flujo en la conexión Yy. . . . 20
5.1.4. Transformadores con "neutro magnético" . . . 21
5.2. Conexión Delta – Delta (Dd) . . . 22
5.2.1. Tensiones y corrientes . . . 22
5.2.2. Desequilibrios e la carga . . . 24
5.2.3. Armónicas de corriente, tensión y flujo en la conexión Dd . . . 25
5.3. Conexión Estrella – Delta (Yd) . . . 25
5.3.1. Tensiones y corrientes . . . 25
5.3.2. Cargas desequilibradas en la conexión Yd . . . 26
5.3.3. Armónicas de corriente, tensión y flujo en la conexión Yd . . . 26
5.4. Conexión Delta – Estrella (Dy) . . . 26
5.4.1. Tensiones y corrientes . . . 26
5.4.2. Cargas desequilibradas en la conexión Dy . . . 27
5.4.3. Armónicas en la conexión Dy . . . 27
5.5. Conexión Estrella - Zigzag (Yz) . . . 28
5.5.1. Cargas desequilibradas . . . 29
5.5.2. Armónicas de corriente, tensión y flujo en la conexión Yz . . . 29
5.6. Conexión en Delta abierto, o conexión en V . . . 30
5.6.1. Tensiones y corrientes . . . 30
5.6.2. Cargas desequilibradas . . . 32
5.6.3. Armónicas en la conexión en V . . . 32
5.7. Conexión Estrella – Estrella con terciario en Delta (Yyd) . . . 32

5.8. Resumen de características de conexiones trifásicas 33
5.9. Conexión Scott 34

Anexos **36**

1. Tipos de transformadores trifásicos **36**
1.1. Transformador trifásico tipo núcleo 36
1.2. Transformador trifásico tipo acorazado 37

2. Conexiones trifásicas de transformadores **39**

3. Resolución de conexiones de transformadores trifásicas **40**
3.1. El desplazamiento angular 40
3.2. Notación utilizada 40
3.3. Desplazamiento angulares posibles 40

4. Características de las conexiones Yy, Dy, Yd y Dd **41**
4.1. Conexión en paralelo de transformadores 3φ en paralelo 41
4.2. Solución de redes trifásicas 42

5. Ejemplos de conexiones de transformadores trifásicos **43**
5.1. Ejemplo 1: Diagramas fasoriales y conexión 3φ YΔ 43
5.2. Ejemplo 2: Determinar el tipo de conexión 44
5.3. Ejemplo 3: ¿Qué conexión se implementa en el esquema 45
5.4. Ejemplo 4: Construir un Yy6 46
5.5. Ejemplo 5: Determinar el tipo de conexión 47
5.6. Ejemplo 6: Implementar una conexión Dy3 48
5.7. Ejemplo 7: Otras conexiones 49

Referencias **50**

Introducción

El transformador es una máquina eléctrica estática, que opera exclusivamente en corriente alterna, recibiendo energía a un cierto nivel de tensión y corriente, con pocas pérdidas.

Al transformador se debe en gran parte el extenso uso de la corriente alterna en los sistemas de potencia: permite que la generación eléctrica se efectúe al voltaje de generación más económico, la transferencia de potencia al voltaje de transmisión más económico, y luego utilizar la energía al voltaje que resulte más adecuado para cada uso específico.

Es necesario estudiar la penetración del transformador en los sistemas trifásicos, ya que estos últimos tienen importantes ventajas frente a los sistemas monofásicos, como:

a) Aumento de la capacidad de transmisión, al permitir transportar el triple de potencia monofásica con el uso de sólo tres cables (4 si se utiliza neutro).

b) Lo anterior permite reducir costos al disminuir la totalidad de cables en los sistemas de transmisión.

c) Eliminación de la potencia pulsante en los sistemas equilibrados.

d) La posibilidad de crear campos rotatorios.

1. Generalidades

En la Figura 1 se muestran 3 transformadores monofásicos conectados a un sistema trifásico primario R-S-T (más adelante se explica el uso de esta nomenclatura), de voltaje V_1 (entre fases), y alimentando un sistema trifásico secundario r-s-t, de voltaje V_2 (entre fases). Es lo que se denomina banco trifásico de transformadores monofásicos. En la figura se muestra una conexión estrella - delta.

En la Figura 2 se muestra un transformador trifásico propiamente tal, del tipo acorazado, conectado a un sistema idéntico al anterior. En este caso, existen superposiciones del flujo magnético provocado por una fase con los de las otras fases, no existiendo entonces independencia magnética entre las fases del sistema trifásico.

En general, las bobinas tanto del primario como del secundario pueden conectarse en estrella (Y) o en delta (Δ), dando lugar a las siguientes conexiones (primero el lado del alta tensión (A.T), y luego el de baja tensión (B.T)) : YY, YΔ , ΔY, $\Delta\Delta$.

Existen también otras conexiones trifásicas como la conexión T, la delta abierta (o conexión en V) y la conexión zigzag Z.

Por último hay una gran variedad de conexiones entre sistemas trifásicos y bifásicos (Le-blanc y Scott), entre trifásicos y hexafásicos (doble y por ejemplo), etc., las cuales no son tratadas en esta publicación.

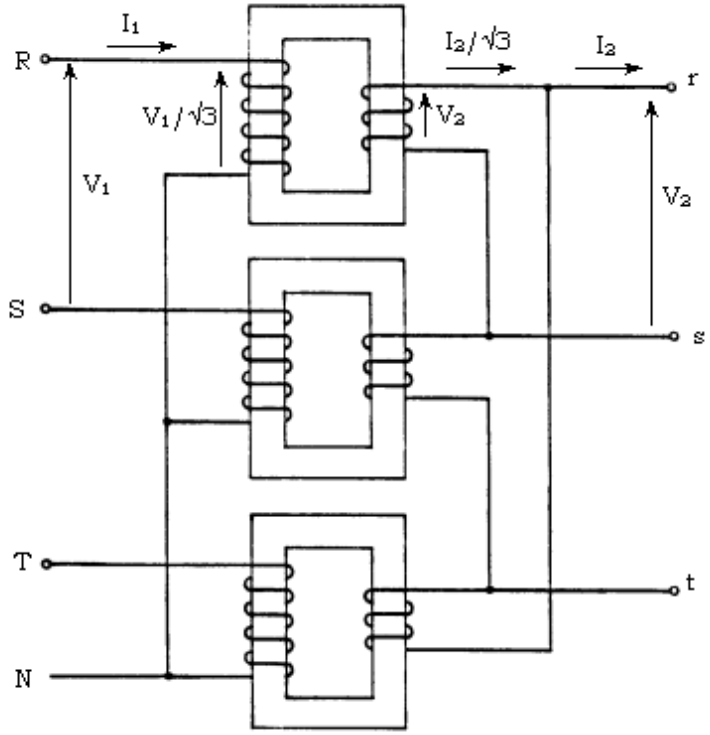


Figura 1: Tres transformadores monofásicos en un sistema trifásico conectados en $Y - \Delta$.

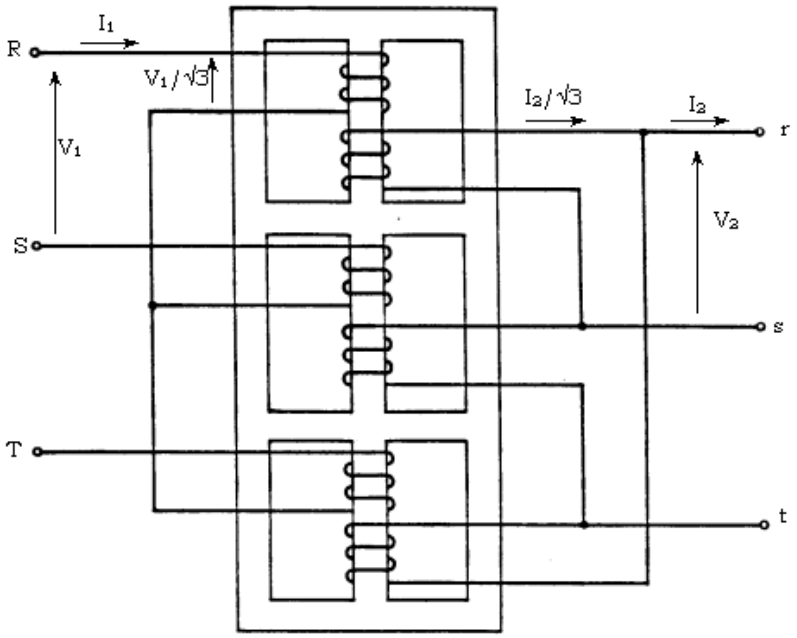


Figura 2: Transformador trifásico, tipo acorazado, en un sistema trifásico.

2. Concepto de polaridad

2.1. Polaridad

El concepto de polaridad relaciona dos bobinas que poseen un flujo magnético común.

Se dice que el terminal H_1 (de la bobina 1) tiene igual polaridad que el terminal X_1 (de la bobina 2) si la tensión entre $H_1 - H_2$ está en fase (o lo está muy aproximadamente) con la tensión entre $X_1 - X_2$. (designación según norma A.S.A.; ver Figura 3).

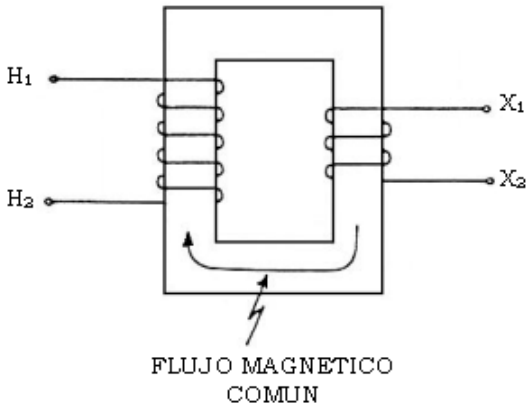


Figura 3: Dos bobinas con flujo magnético común.

Los métodos para la determinación de la polaridad están contenidos en el apunte de Transformadores Monofásicos.

2.2. Definiciones y normas

En este párrafo se darán algunas definiciones y notaciones, todas ellas indicada en normas técnicas. Las normas técnicas eléctricas más usadas en nuestro país son las NCH (normas chilenas), la IEC (International Electrotechnical Commission), las VDE (normas alemanas), las ASA (American Standard association), las NEMA (National Electrical Manufacturers Association) y las normas B.S. (British Standards).

En la Tabla 1 se muestran las designaciones, representación y ubicación de los bornes en la tapa del transformador, según algunas de las normas antes señaladas.

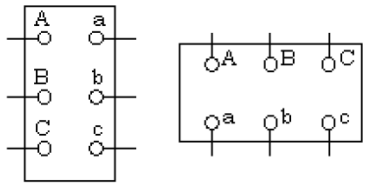
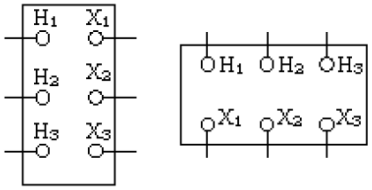
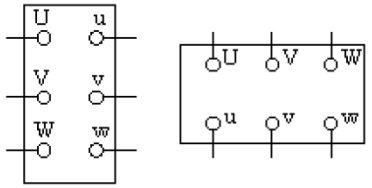
Norma	Bornes de A.T.	Bornes de B.T.	Esquema
I.E.C., N.CH. & B.S.	A–B–C	a–b–c	
A.S.A.	H_1–H_2–H_3	X_1–X_2–X_3	
V.D.E.	U–V–W o también R–S–T	u–v–w o también r–s–t	

Tabla 1: Designaciones de bornes de transformadores según las normas más usadas.

En Chile cada empresa utiliza de preferencia una de estas normas, de acuerdo a la procedencia de sus equipos y a su tradición. Sin embargo, la tendencia mundial es emplear las normas I.E.C.

En el cuadro anterior, para la norma I.E.C, las fases de A.T. se denotan A, B, C y las correspondientes a B.T. a, b, c. En la norma A.S.A., las fases serán 1, 2, 3 y los bornes de A.T. serán H y los de baja X.

La norma I.E.C. define como "bornes homólogos" a aquellos (uno en A.T. y el otro en B.T.) designados con la misma letra. Nótese que los bornes homólogos pueden ser de igual polaridad o de polaridad opuesta.

En la norma A.S.A. serán homólogos aquellos que tengan igual subíndice.

Un transformador tendrá polaridad sustractiva cuando sus bornes homólogos tengan igual polaridad, y tendrá polaridad aditiva cuando éstos sean de polaridad apuesta, del mismo modo que para transformadores monofásicos

3. Diagramas vectoriales de tensión

3.1. Introducción

Para relacionar las tensiones y/o corrientes primaria con las secundarias, no basta en los sistemas trifásicos con la relación de transformación, sino que se debe indicar los desfases relativos entre las tensiones de una misma fase entre el lado de A.T. y B.T. Un modo de establecer estos desfases consiste en construir los diagramas fasoriales de tensiones y corrientes, conocidos: la conexión de ambos lados (A.T. y B.T.) ya sea Δ o Y; las polaridades de los enrollados en un mismo circuito magnético o fase; y las designaciones de los bornes.

En los diagramas fasoriales se indican tanto los fasores de A.T. como los de B.T., y ambos se construyen para secuencia positiva (de tensiones) considerando: las polaridades, la designación de los bornes y, por supuesto la conexión. Si se considera secuencia negativa para tensiones, los resultados serán, en general, distintos de los obtenidos para secuencia positiva.

3.2. Grupo de conexión y desplazamiento angular

Se define como desplazamiento angular el desfase entre tensiones homólogas (i.e.: entre bornes homólogos) medido desde A.T. hacia B.T. Es decir, es el ángulo en que el fasor de tensión fase neutro primario adelanta al fasor fase–neutro secundario de la misma fase (en vacío).

A modo de ejemplo, en la Figura 4 se indica el caso de desfase de 120º para una conexión YY, y en Fig. 5 un desfase de 30º para una conexión YΔ.



Figura 4: Desplazamiento angular entre tensiones de 120°.

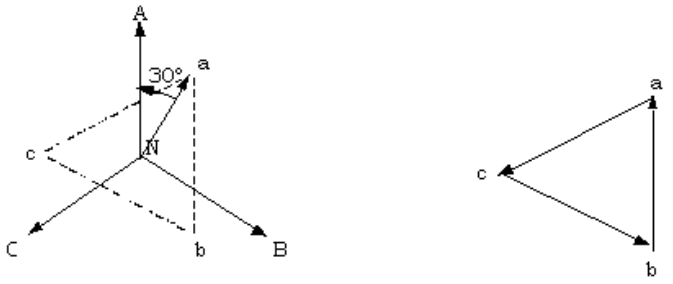


Figura 5: Desplazamiento angular entre tensiones de 30°.

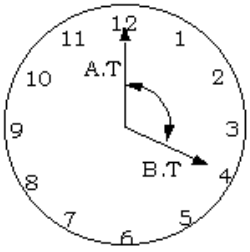
La conexión trifásica de un transformador queda totalmente definida por un código en que:

i) El primer carácter es una Y o D según si el lado de A.T. está conectado en estrella o delta respectivamente.

ii) La segunda letra indica la conexión del lado de baja tensión y puede ser, similarmente, y o d.

iii) El tercer carácter es un dígito de 0 a 11 indicando el desplazamiento angular. Se define como el número de múltiplos de 30° que el voltaje fase–neutro del lado de **baja** tensión **atrasa** al lado de **alta** tensión de la misma fase. Este desplazamiento angular es también equivalente al ángulo entre el minutero y el horario de un reloj de esfera en que el minutero se ubica en el dígito indicativo de la conexión y corresponde al fasor de B.T. (ver Figura 6).

Según lo anterior, si el diagrama fasor de la Figura 6 corresponde a un transformador con sus bobinas de A.T. y B. T. conectadas en estrella, su grupo de conexión es el Yy4. Análogamente, para el transformador $Y\Delta$ de la Figura 5, el correspondiente grupo de conexión es Yd1.



A.T.	B.T.	DESPLAZAMIENTO ANGULAR
Y	I	NUMERO ENTERO DE
O	d	0 ⟶ 11

Figura 6: Dígito indicador del desplazamiento angular y notación para los grupos de conexión.

3.3. Determinación del tipo de conexión

Dadas las conexiones y polaridad de las bobinas de un transformador en un circuito trifásico (ejemplo Figura 7), para determinar su grupo de conexión se procede como sigue:

a) Se determinan, por inspección, las conexiones en A.T. y en B.T. En el caso de la Figura 7 ambas son estrella, y por lo tanto se puede escribir Yy.

b) Se construye el diagrama fasor de las tensiones. Para ello debe darse un sistema de tensiones para el lado de A.T. de secuencia positiva, como el de la Figura 8.

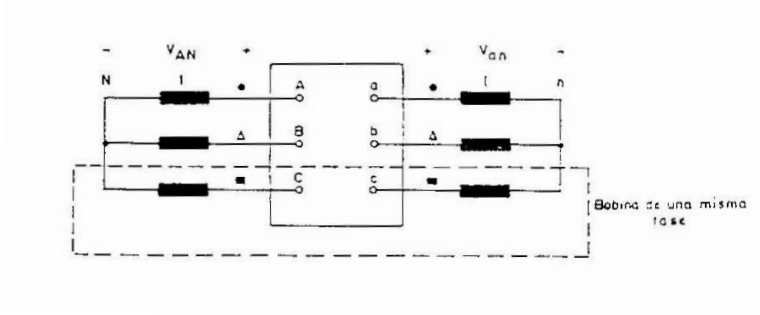


Figura 7: Conexiones y polaridad de un transformador trifásico.

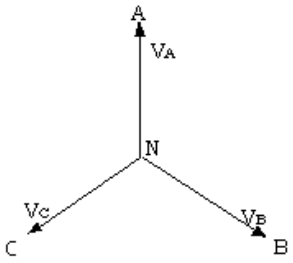


Figura 8: Sistema de tensiones primarias de secuencia positiva.

Con ayuda de las Figuras 7 y 8, puede verse que: el enrollado 1 está en la misma fase que el enrollado I del secundario; 1 tiene aplicada la tensión V_{An} (o V_A) positiva (A con respecto a N). Por lo tanto, en I se inducirá una tensión en fase con la anterior (Figura 9) positiva (a con respecto a n), ya que A y a son de igual polaridad.

Similarmente para los enrollados de las fases B y C de A.T. y B.T., obteniéndose los diagramas de la Figura 10.

De la Figura 10 se encuentra que el desplazamiento angular es cero, por lo tanto el grupo de conexión es Yy0.



Figura 9: Tensión aplicada al enrollado de la fase A, e inducida en el lado de B.T.

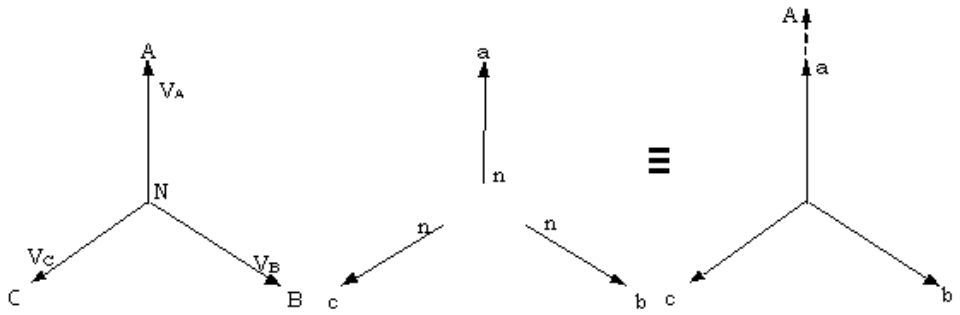


Figura 10: Diagrama fasor de A.T. y B.T. del transformador de la Figura 7.

• Otro ejemplo se ilustra en el banco de transformadores de la Figura 11. En este caso la conexión es Yy, y el diagrama fasor se obtiene de la Figura 12, a partir del cual para la fase a se tienen las tensiones indicadas en la Figura 13.

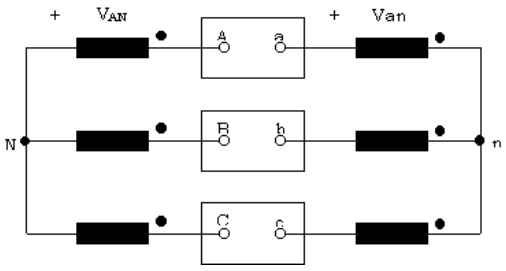


Figura 11: Banco trifásico Yy.

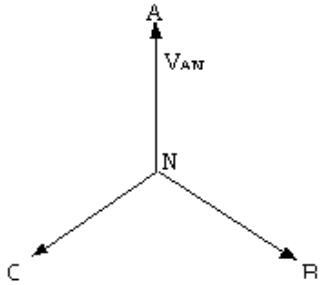


Figura 12: Tensiones primarios del transformador de la Figura 11.

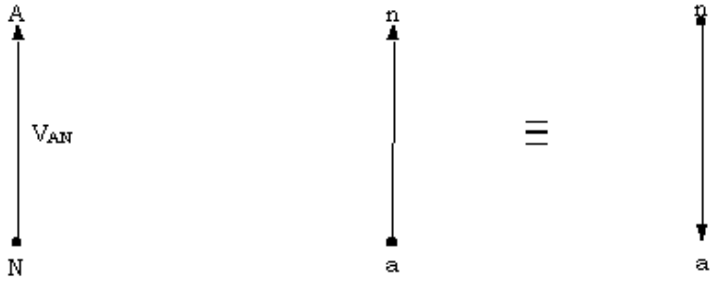


Figura 13: Tensiones de fase *An*, *an*, del transformador de la Figura 11.

Procediendo similarmente para las otras fases, se obtienen finalmente los diagramas de la Figura 14, donde se concluye que el grupo de conexión es 6, (desfase de 180°) es decir Yy6.

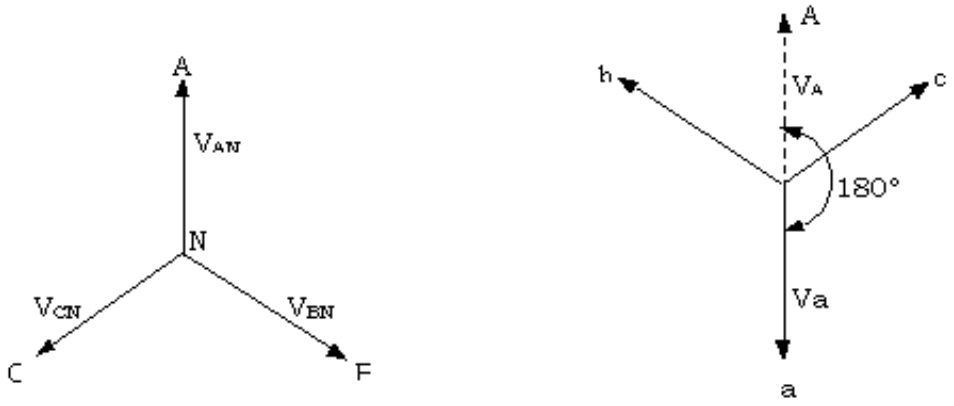


Figura 14: Diagrama fasor de las tensiones de A.T. y B.T. (nótese que ambos son de secuencia positiva).

• En la Figura 15 se ilustra otro ejemplo, donde la conexión es Dy. El diagrama fasor en el primario conviene expresarlo en términos de las tensiones entre fases, obteniéndose la Figura 16.

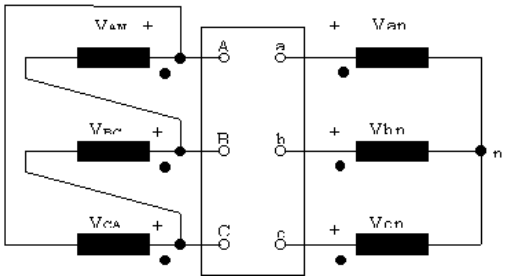


Figura 15: Transformador trifásico Dy.

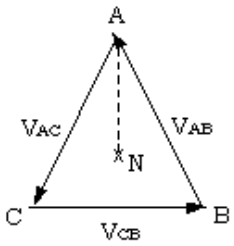


Figura 16: Diagrama fasor de A.T. del transformador de la Figura 15.

Examinando ambas figuras, se encuentra que la bobina 1 tiene aplicada la tensión V_{AB} (se define A positivo con respecto a B), y por lo tanto en la bobina I se inducirá una tensión en fase (definida de modo que a sea positivo con respecto a n), ya que A y a tienen igual polaridad. La Figura 17 muestra esta situación.

Al extender el análisis a las restantes fases, se obtiene el diagrama de la Figura 9, resultando el grupo de conexión Dy11.

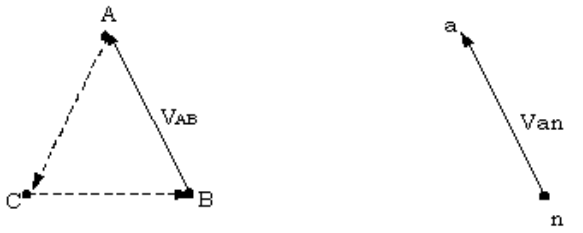


Figura 17: Tensión en la fase A–B de A.T. y tensión inducida V_{an} en B.T.

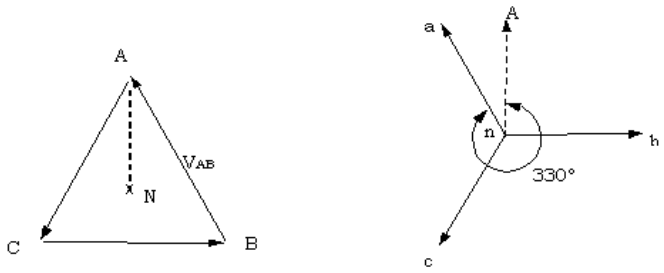


Figura 18: Diagrama fasor de la conexión de la Figura 15.

• Como último ejemplo, considérese el transformador de cuatro enrollados de la Figura 19, en el que se desea determinar el grupo de conexión del secundario y del terciario.

En la Figura 20 se desarrollan los diagramas fasores correspondientes, encontrándose que el grupo de conexión es Yd11z11 (el terciario está con sus enrollados subdivididos en dos, en conexión zigzag).

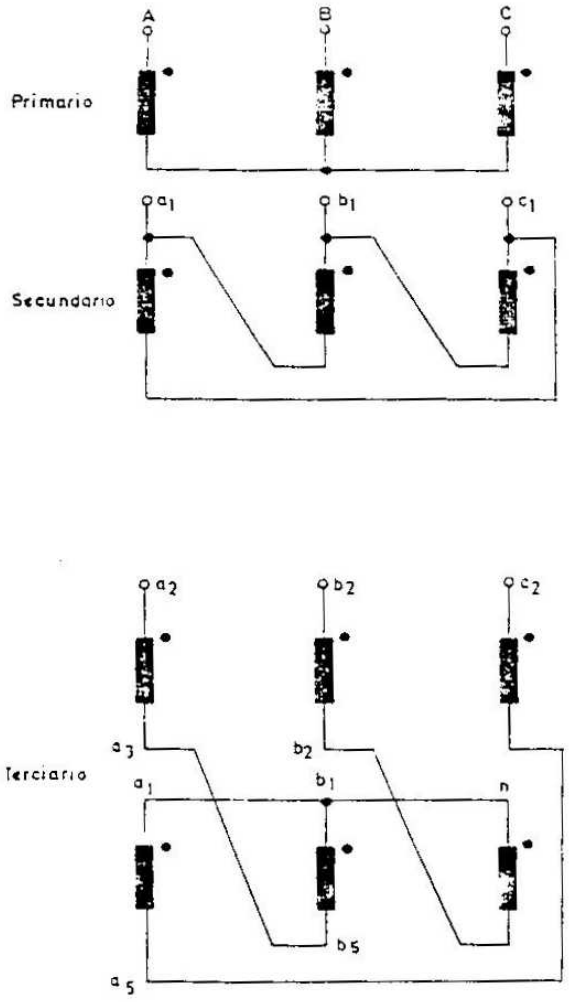


Figura 19: Transformador trifásico de cuatro enrollados.

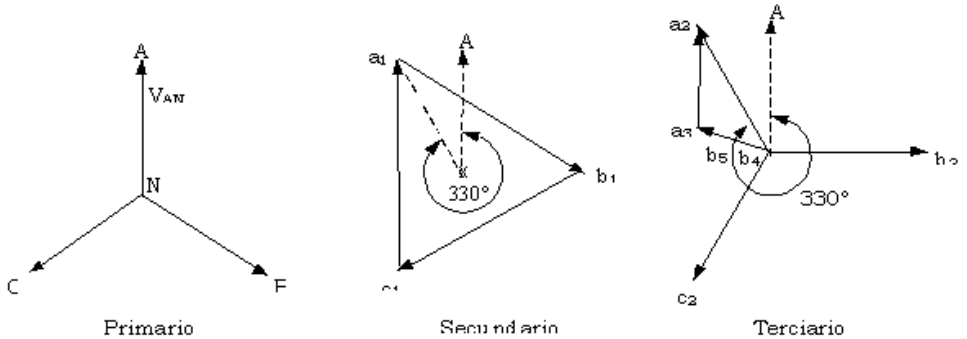


Figura 20: Diagramas fasoriales del transformador de la Figura 19.

3.4. Determinación experimental del diagrama fasor

El diagrama fasor puede determinarse experimentalmente mediante medidas de tensión alterna entre los bornes de A. T. y B. T. Para ello debe conectarse entre sí un borne de A.T. con uno de B.T. Normalmente, no hay peligro al hacer esta conexión, excepto cuando ya existe una conexión similar (como por ejemplo en los autotransformadores).

En general, para esta prueba, se prefiere conectar los neutros si están accesibles, luego y con el transformador en vacío se alimenta uno de los lados con tensión trifásica igual o menor a la nominal, a frecuencia nominal, y de secuencia conocida (positiva). En esta condición se miden las tensiones entre los bornes del secundario y las fases de alimentación del primario.

Conociendo la secuencia y la magnitud de las tensiones de alimentación y dibujando a escala las tensiones medidas, es posible construir el diagrama fasor de las tensiones y determinar el desplazamiento angular.

Por ejemplo, sea un transformador trifásico cuya conexión se desconoce, sabiéndose sólo que:

a) Sus tensiones nominales son de 220/110 kV.

b) El lado de 220 kV tiene neutro accesible.

c) El lado de 110 kV no tiene neutro accesible.

d) No hay conexiones eléctricas entre el primario y el secundario.

e) Cuando se alimentó en A.T. con 173.2 kV, simétricos y equilibrados, de secuencia positiva, a frecuencia nominal, y conectando el borne a del secundario al neutro primario, se midieron las siguientes tensiones:

$$V_{Cc} = 86.6 \text{ kV}$$
$$V_{Bb} = 86.6 \text{ kV}$$
$$V_{Ac} = 150.0 \text{ kV}$$

Las que permiten determinar V_{ac}, y:

$$V_B = 139.19 \text{ kV}$$
$$V_{Bb} = 50.0 \text{ kV}$$
$$V_{ab} = 108.97 \text{ kV}$$

Que permiten el calculo de V_{ab}.

Como el borne a coincide con el neutro primario, se tiene que:

$$V_{Aa} = V_{AN} = 173.2/\sqrt{3} = 100 \text{ kV}$$
$$V_{Ba} = V_{BN} = 100 \text{ kV}$$
$$V_{Ca} = V_{CN} = 100 \text{ kV}$$

Entonces, para comenzar se construye fasor del primario (Figura 21(a)), el cual corresponde en este caso a A.T. y muestra una conexión estrella. Para esto se construye un eje sobre el cual se copia a escala (cualquier escala) la magnitud del voltaje medido para alguno de los enrollados del transformador (en este caso f–n), luego con centro en el origen del trazo se copia la magnitud a escala del enrollado siguiente de acuerdo a la secuencia de fases, en este caso a 120° por tratarse de un primario en estrella. Con esto quedan determinados los puntos A, B y C.

Luego, sobre este diagrama para determinar el punto c del secundario, se traza un círculo de radio $V_{Cc} = 86.6$ kV, con centro en C (Figura 21(b)). Luego con centro en B y en A se trazan círculos con radios V_{Bc} y V_{Ac} respectivamente, determinando en el punto de corte el punto c del diagrama fasor secundario, que en este caso corresponde a una delta. Después se repite el procedimiento para encontrar el punto correspondiente al borne b.

El borne a queda determinado inmediatamente, ya que el experimento se realizó con dicho borne a la misma tensión que la referencia del primario, que es centro de la estrella.

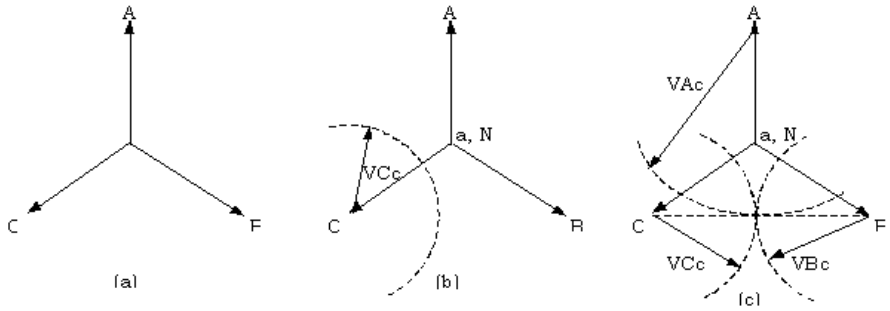


Figura 21: Determinación del diagrama fasor del secundario a partir de datos experimentales.

Lo anterior y la secuencia son suficientes para determinar el diagrama fasor de las tensiones secundarias, y por ende el desplazamiento angular. (ver Figura 22).

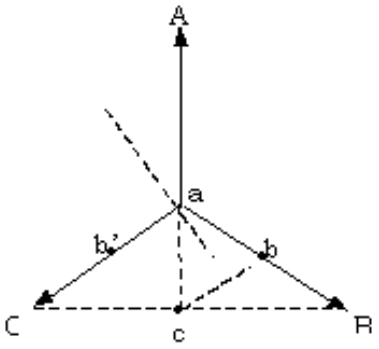


Figura 22: Construcción experimental del diagrama fasor.

NOTA: El punto b' forma un Δ equilátero con a y c, pero da a una secuencia opuesta a la alimentación.

De la Figura 22 se determina finalmente que el grupo de conexión puede ser: Yd11, Zy11, o Yz11, pues:

1. Al ser 11 el desplazamiento angular solo son posibles conexiones $Y - \Delta$ ó $Y - Z$.
2. El lado de A.T. debe ser Y ó Z ya que tiene neutro.

Sin embargo, es más probable que la conexión sea Yd11 ya que el uso de la Z es bastante menos frecuente, y además para fines de conexión (por ejemplo, en paralelo con otras unidades) y/o estudio de redes basta conocer el desplazamiento angular.

3.5. Conexiones trifásicas más usuales en transformadores

El cuadro de la Figura 23 muestra los detalles de las conexiones trifásicas más usadas en transformadores y el desplazamiento angular de cada una de ellas.

En los diagramas de conexión de dicha figura, los bornes se han designado por I, II, III y i), ii), iii), sólo con fines de ilustración, ya que los símbolos usados en la designación de los bornes varían entre los diversos países y normas como se ha mencionado.

En la Figura 24 se indican las conexiones usuales según la norma alemana VDE 0532/8.64 9. 3. Las conexiones en recuadro corresponden a las que se está dando preferencia en nuevas instalaciones.

NOTA: En los diagramas de conexión en que no se indica la polaridad de los enrollados se supone que ésta es sustractiva, a menos que se indique explícitamente lo contrario.

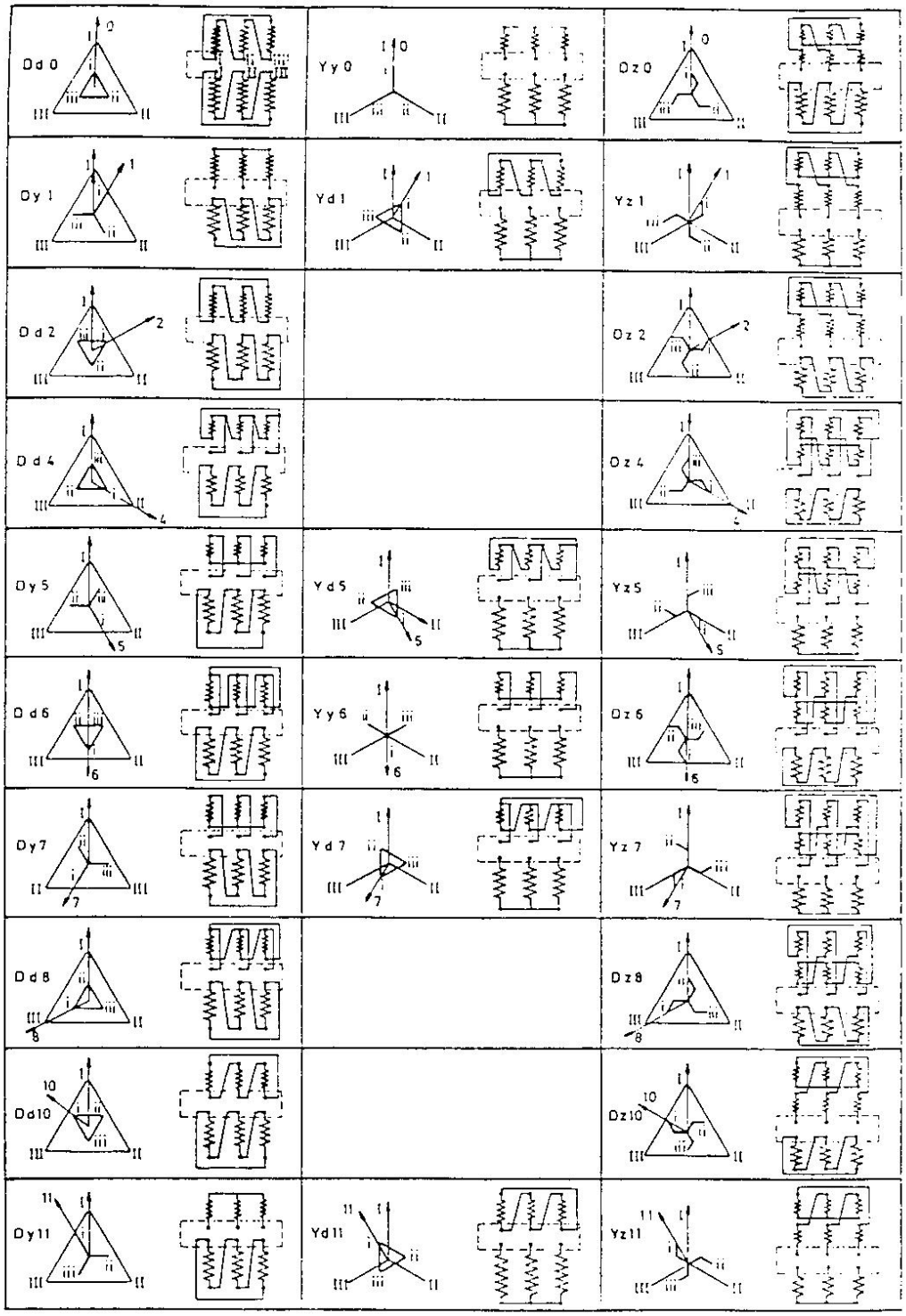


Figura 23: Conexiones trifásicas más usuales en transformadores según normas I.E.C. 76.

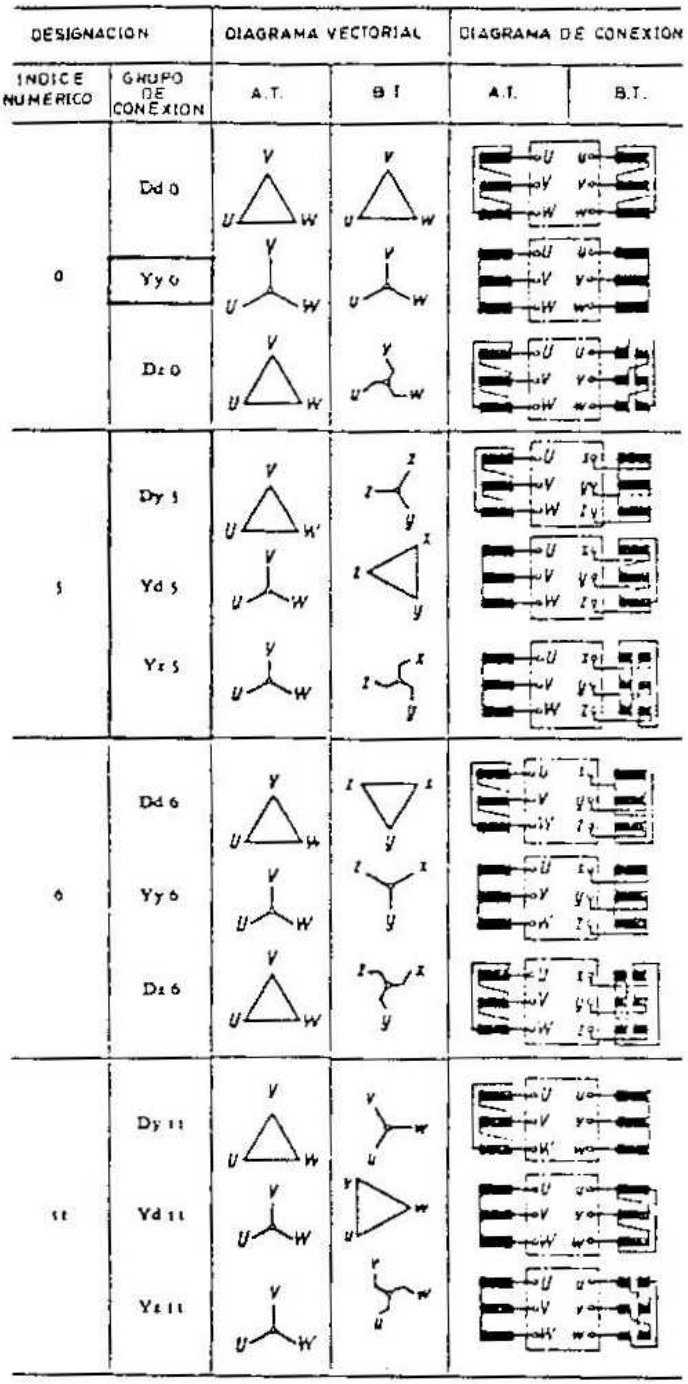


Figura 24: Conexiones trifásicas más usuales en transformadores según VDE 0532/8.64 9. 3.

4. Razón de Transformación

4.1. Consideraciones generales

La razón de transformación es la razón que existe entre el número de vueltas del primario y el número de vueltas del secundario.

Las recomendaciones generales para medirla son:

a) La medida de la razón de transformación debe efectuarse a la tensión de trabajo, o, menor, y deberá hacerse en todos los taps del transformador. Los transformadores que tienen 500 Watts o menos y que tienen una corriente de excitación mayor que el 10 % serán probados sólo a tensión y frecuencia nominal.

b) En transformadores trifásicos en los cuales se tiene acceso al neutro, se puede medir la razón aplicando una fuente monofásica de tensión.

c) En transformadores trifásicos conectados en estrella y cuyo punto neutro primario es inaccesible, se aplica tensión trifásica y se mide en forma monofásica las tensiones por línea.

Los métodos que se aplican en la práctica para medir la razón de transformación se detallan en el Anexo del apunte de Transformadores Monofásicos: “Métodos para medir la Razón de Transformación”.

5. Propiedades de las principales conexiones trifásicas

5.1. Conexión Estrella – Estrella (Yy)

5.1.1. Tensiones y corrientes

Para altas tensiones la conexión en estrella es siempre preferible desde el punto de vista económico, sobre todo si la capacidad del transformador no es muy elevada.

La tensión aplicada a cada enrollado es menor que la tensión entre fases de la línea, la corriente por cada enrollado es igual a la corriente de línea (Figura 25).

En comparación con la conexión Δ para igual servicio, a la conexión y le corresponde una tensión más baja por devanado y por consiguiente una corriente más elevada. Esto involucra menor aislamiento y el empleo de secciones de conductor (cobre) mayores, que dan rigidez a las bobinas y las protege mejor contra los enormes esfuerzos mecánicos que se producen durante cortocircuitos.

También al requerir mayores secciones del alambre, aumenta la capacidad electrostática entre espiras y las sobretensiones transitorias quedan mejor distribuidas a lo largo del enrollado.

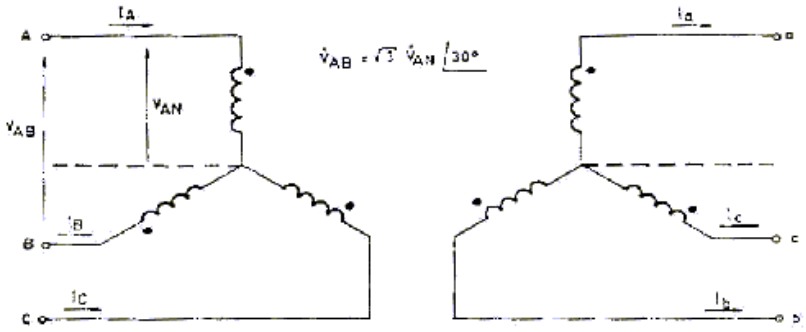


Figura 25: Conexión Yy.

El montaje en estrella permite además, tener el neutro accesible para la alimentación de la redes de baja tensión en servicio mixtos de luz y fuerza y, para la protección, por medio de la puesta a tierra en el lado de alta.

La inutilización de un devanado impide el funcionamiento total del sistema trifásico, quedando reducido a un sistema monofásico cuya tensión es la compuesta y cuya corriente permisible es la de una fase, reduciéndose la capacidad a un 58 %.

Si se trata de tres transformadores monofásicos debe desconectarse íntegramente de la línea el transformador averiado; en sus defecto, si se trata de uno trifásico, el devanado defectuoso debe aislarse, separando de la red el otro enrollamiento correspondiente de la misma fase y poniéndolo en cortocircuito para anular el flujo de dispersión que tiende a pasar por el núcleo (Figura 26).

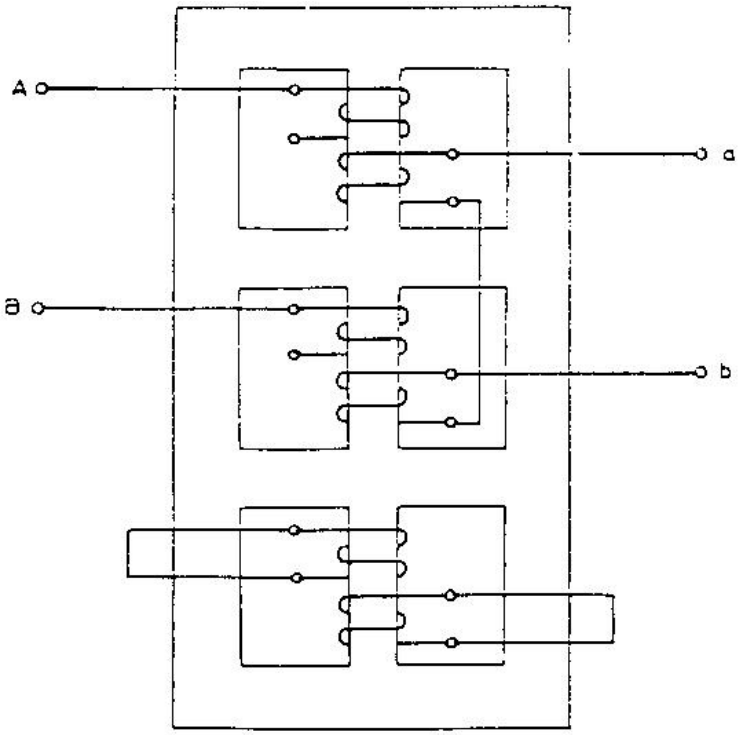


Figura 26: Transformador trifásico con una de sus fases dañada, aislado de la red y en cortocircuito.

5.1.2. Desequilibrios en la carga

Debido al corrimiento del neutro, (tensiones fase – neutro desequilibradas) no debe usarse la conexión YY con cargas fase-neutro desequilibradas. En transformadores trifásicos tipo columna se acepta un desequilibrio de hasta un 10 %. En cambio, en transformadores monofásicos conectados en YY, es muy inconveniente conectar cargas desequilibradas.

5.1.3. Armónicas de corriente, tensión y flujo en la conexión Yy.

Si el transformador trifásico es del tipo acorazado o si está constituido por unidades monofásicas, al conectar el neutro primario a tierra, la corriente de tercera armónica (necesaria para crear un flujo sinusoidal) circula libremente por cada enrollado de la estrella y retorna por el neutro. La tensión secundaria es sinusoidal, pero las corrientes armónicas que circulan por la línea que alimenta al primario producen fuertes interferencias inductivas sobre las líneas telefónicas inmediatas. Si el neutro del lado de B.T también se conecta a tierra, la tercera armónica de magnetización puede circular por esos conductores y el efecto es análogo al anterior.

Cuando los neutros del primario y del secundario están aislados de tierra, la terceras armónicas de corriente (que están en fase) no pueden circular por los enrollados por faltarles el conductor de retorno. La forma de onda del flujo resulta aplanada, lo que se manifiesta como armónicas en la forma de onda de las tensiones (Figura 27).

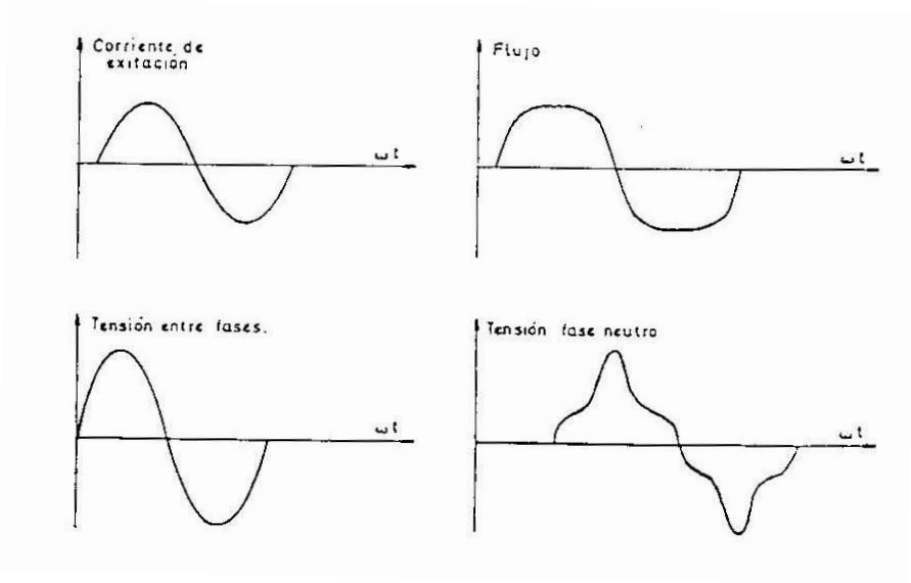


Figura 27: Formas de onda para la conexión YY sin neutro.

La forma de onda aplanada del flujo se debe a la presencia en ella de una tercera armónica.

Estas armónicas de flujo (en fase) encuentran en estas disposiciones de núcleos, circuitos para establecerse sin atenuación, produciendo una armónica de tensión, que provoca una sobretensión fase-neutro solamente. Esta sobretensión puede ser muy intensa, poniendo en peligro el aislamiento de las bobinas. Por esto, los bancos de transformadores monofásicos o los transformadores trifásicos acorazados con neutros levantados de tierra deben diseñarse para una densidad de flujo que aleje la posibilidad de saturación del hierro.

La tercera armónica de tensión solamente aparece entre fase y neutro y puede alcanzar valores del 30 al 50 % de la componente fundamental. Las tensiones entre fases no presentan componentes de tercera armónica porque, al componerse en el circuito de los enrollados, lo hacen en sentido opuesto (restándose) obteniéndose una resultante nula.

5.1.4. Transformadores con “neutro magnético”

En los transformadores trifásicos tipo núcleo o columna (Figura 28) la falta de neutro primario, aunque impide circular a la componente de tercera armónica de la corriente de magnetización no deforma sensiblemente las tensiones fase-neutro porque la tercera armónica del flujo no encuentra un circuito magnético permeable por donde cerrarse, haciéndolo por el aire, con lo cual su magnitud no excede casi nunca de un 5 % de la fundamental.

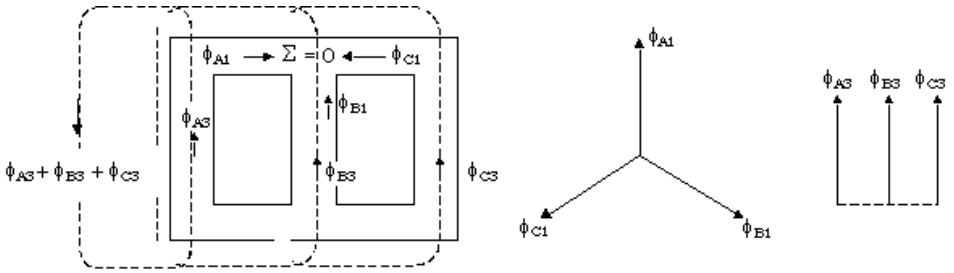


Figura 28: Transformador trifásico tipo núcleo (o columna).

La falta de neutro primario evita interferencias inductivas e incluso la falta de neutro secundario no aumenta las tensiones entre bobinas y núcleos, con lo cual el aislamiento puede hacerse en forma normal.

El desequilibrio de cargas con neutro secundario y ausencia de él en el primario, tampoco altera tan profundamente como en el caso anterior el equilibrio de tensiones, ya que el flujo creado por las intensidades primarias en las fases no cargadas queda compensado por el propio de la carga secundaria, cuyo circuito magnético de retorno debe cerrarse necesariamente a lo largo de los núcleos respectivos de las otras dos fases. No se recomienda, sin embargo, que el desequilibrio exceda de un 10 % de la corriente de plena carga.

Esta disposición (núcleo tipo columna) presenta entonces todas las ventajas de la conexión en estrella, sin que se hagan manifiestas en forma apreciables sus desventajas.

En resumen, las características más importantes de la conexión Yy son:

a) Adecuados para altas tensiones.

b) Sin neutros no permite alimentar cargas 1φ.

c) Sin neutros no produce alteraciones importantes en redes de comunicaciones vecinas.

d) Sin neutros se distorsiona la tensión fase-neutro.

5.2. Conexión Delta – Delta (Dd)

5.2.1. Tensiones y corrientes

Cada enrollado debe estar diseñado para la tensión entre fases de la línea, sin embargo, la corriente por cada enrollado es menor que la corriente por la línea, ya que se tiene (Figura 29).

$$I_A = 3I_{AB} - 30^\circ$$

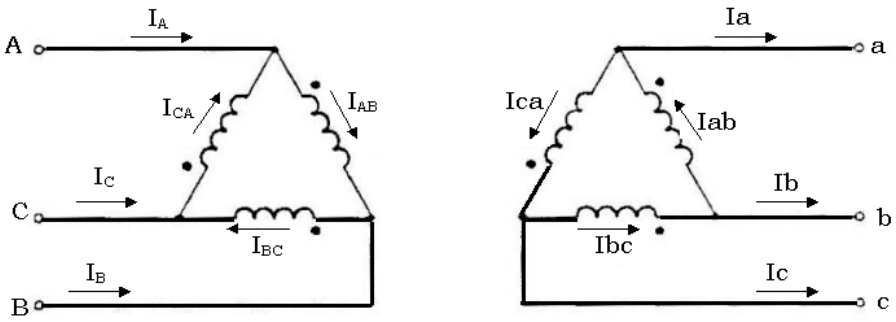


Figura 29: Corrientes y tensiones en la conexión Dd.

Al ser la corriente por los devanados menor, la sección de los conductores se puede disminuir en $1/\sqrt{3}$, con respecto a la conexión y para igual densidad de corriente.

La conexión Dd, por carecer de neutro, no permite la alimentación monofásica a cargas secundarias, o a redes mixtas de luz y fuerza de cuatro líneas. Tampoco es posible la protección de puesta a tierra. Todo esto limita sus posibilidades de aplicación.

Esta conexión es conveniente sólo para pequeñas potencias, con corrientes de línea fuertes y tensiones bajas.

Si falla un enrollado (una de las unidades monofásicas en el caso de un banco) la red trifásica puede seguir alimentándose, pero con una potencia menor, con la misma tensión entre fases limitando la corriente de línea al valor de la corriente que permite cada enrollado (A esta configuración se le denomina conexión en V o delta abierta). La potencia se reduce al 58 %.

Si la instalación se compone de transformadores monofásicos, la unidad averiada se desconectará simplemente de la línea (Figura 30).

Si el circuito magnético es de tipo acorazado, se desconectan los dos devanados de la fase defectuosa y se pondrá el enrollamiento serie de estos dos en cortocircuito para limitar el flujo de dispersión por el núcleo correspondiente.

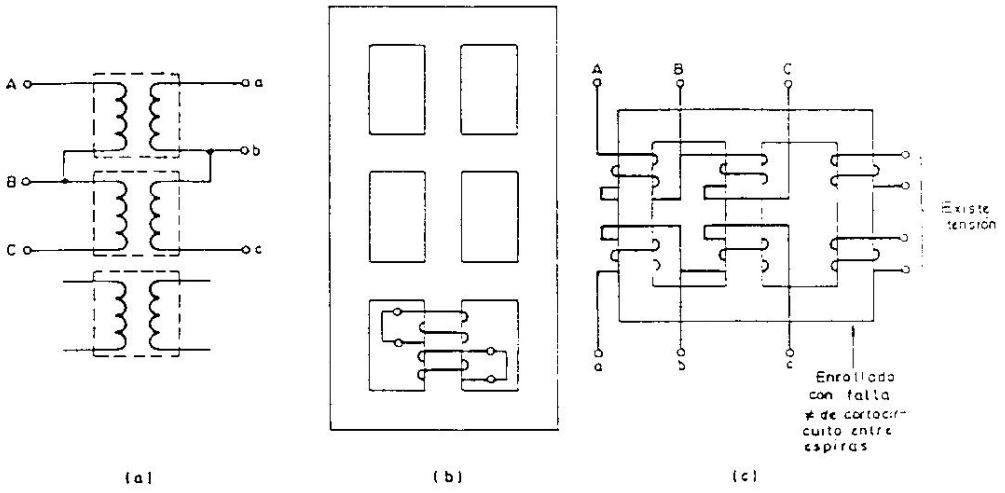


Figura 30: Conexión Dd con falla en la fase *c*.

En el transformador de tipo "núcleo" (o columna) los flujos de las otras dos fases continúan desfasados entre sí como ordinariamente, cerrándose parcialmente el circuito magnético normal por la tercera columna. Por lo tanto, sus devanados deberán mantenerse con los extremos aislados ya que ellos aún poseen tensiones inducidas.

Cuando la avería fuese por cortocircuito entre espiras, el transformador tipo columna íntegro debe ser eliminado de servicio.

5.2.2. Desequilibrios e la carga

En cuanto al trabajo con cargas desequilibradas y cualquiera que sea también el tipo de núcleo, la corriente producida por una carga monofásica entre fases del enrollado secundario provoca corrientes primarias distribuidas igualmente por los enrollados y, por consiguiente, no se produce en las fases sobreexcitación alguna, limitándose el desequilibrio de tensiones al que proviene de las caídas en las respectivas impedancias.

En la Figura 31 se indica, de modo aproximado, el reparto de la corriente en las tres fases, para una transformación trifásica, conectada en Dd, de razón 1:1, con una carga monofásica.

Cuando los transformadores son monofásicos, conviene que sus impedancias de cortocircuito sean idénticas para evitar el desequilibrio en el reparto de cargas desequilibradas.

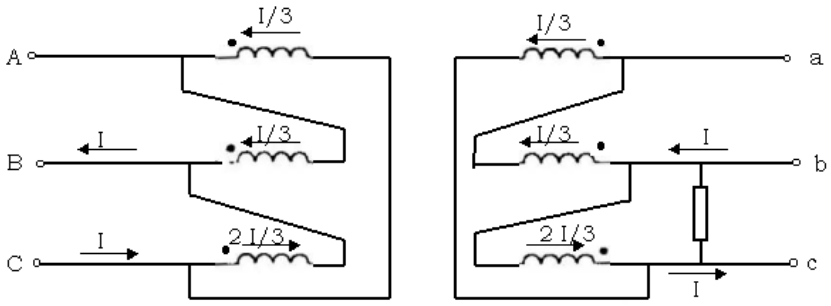


Figura 31: Conexión Dd con una carga monofásica.

5.2.3. Armónicas de corriente, tensión y flujo en la conexión Dd

Independiente de la estructura del circuito magnético, esta conexión permite la circulación local de las terceras armónicas de corrientes (dentro de las deltas primarias y secundarias), sin dar lugar a perturbaciones inductivas transmitidas por la líneas.

Al poder circular corrientes de tercera armónica (y sus múltiples impares), la tensión (y el flujo) están libres de ellas, obteniéndose tensiones sinusoidales, libres de sobretensiones debidas a armónicas.

Resumiendo, las características más importantes de este tipo de conexión son:

a) Sólo apto para bajas y medianas potencias.

b) Enlace entre redes de A.T. y de distribución.

c) No puede alimentar cargas monofásicas.

d) Puede funcionar con una unidad fallada (VV).

5.3. Conexión Estrella – Delta (Yd)

5.3.1. Tensiones y corrientes

En esta conexión, con la estrella en el lado de A.T, las tensiones por devanado son las más favorables, por lo que se usa preferentemente para la reducción de tensión en las redes de transmisión y distribución de energía que no precisan neutro secundario.

La carencia de neutro secundario no permite la puesta a tierra del mismo ni la utilización de circuitos de cuatro hilos.

Cualquier avería en una fase impide completamente el funcionamiento del sistema.

5.3.2. Cargas desequilibradas en la conexión Yd

En la Figura 32 se muestra la repartición del desequilibrio producido por una carga monofásica en el secundario (d), para transformadores de relación $1{:}\sqrt{3}$ (relación de transformación 1:1 para las tensiones por fase).

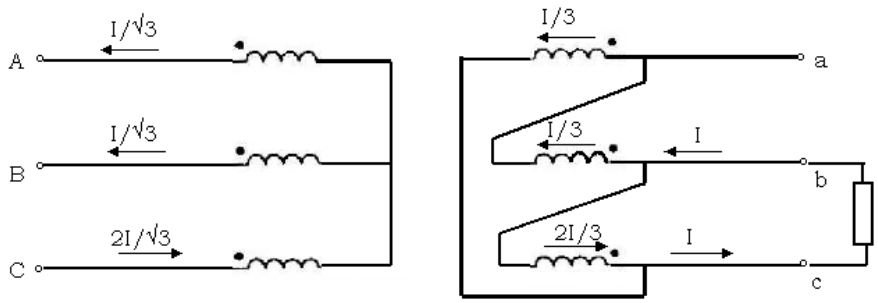


Figura 32: Repartición de corrientes en la conexión Yd con una carga monofásica.

Cualquiera sea la clase de circuito magnético empleado, el desequilibrio de cargas secundarias se transmite al primario en forma compensada para cada fase, sin producir sobreexcitación en ninguna de ellas.

5.3.3. Armónicas de corriente, tensión y flujo en la conexión Yd

La tercera armónica de la corriente de magnetización circula sin dificultad por los enrollados secundario (sin salir a la línea) y no se producen sobretensiones por falta de excitación ni interferencias sobre las líneas telefónicas.

El primario puede ponerse a tierra como protección, pero si en la central se ha tomado también esta medida, la tercera armónica de corriente se reparte entre el primario y el secundario y puede dar lugar a interferencias, menores de todas formas que las correspondientes a la conexión Yy.

Las características principales de esta conexión serán entonces:

a) Típico en salida de centrales.

b) Apta en A.T. y d en B.T.

c) No requiere necesariamente de neutro. Hay camino para las terceras armónicas.

5.4. Conexión Delta – Estrella (Dy)

5.4.1. Tensiones y corrientes

Así como la conexión Yd es la más conveniente como reductora de tensión, esta es la transformación elevadora más práctica desde el punto de vista de la tensión por enrollado.

Aunque esta conexión es ampliamente usada como elevadora de tensión, es bastante usada también en distribución, como reductora, por la posibilidad de alimentar una red de cuatro conductores en baja tensión (manteniendo la D en el otro lado como compensadora de armónicas y cargas desequilibradas).

Por otra parte, la falla de un solo devanado deja inutilizado el sistema completo.

5.4.2. Cargas desequilibradas en la conexión Dy

El desequilibrio de las cargas secundarias se neutraliza por la acción de la Delta primaria en las tres fases sin dar lugar a sobreexcitación por corriente no compensada en ninguna de ellas.

En la Figura 33 a) y b) se muestran la repartición de corrientes para cargas monofásicas secundarias entre fases y fase neutro.

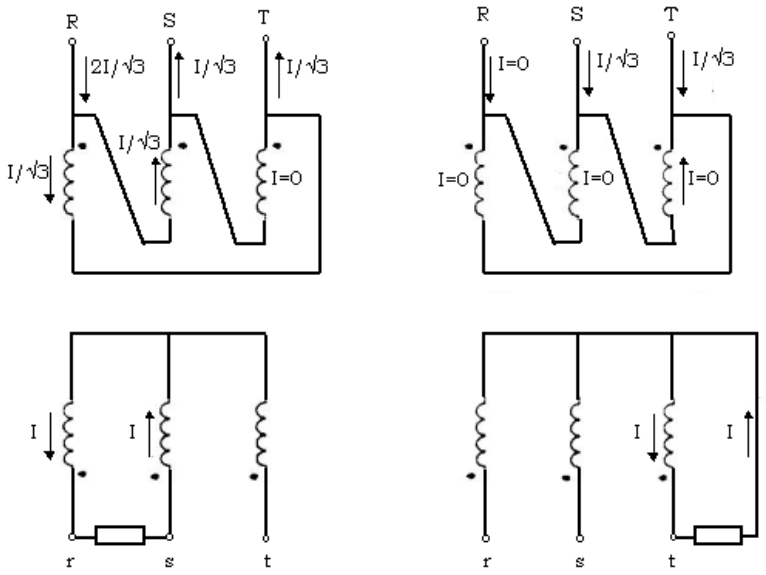


Figura 33: Repartición de corrientes en la conexión Dy con cargas monofásicas.

5.4.3. Armónicas en la conexión Dy

La tercera armónica de la corriente de magnetización se establece en la delta primaria sin afectar a la red secundaria si ésta no cierra su retorno por el neutro.

En redes de transmisión con líneas de gran longitud, el efecto de la capacidad entre fases y tierra, puede constituir un circuito de muy baja impedancia para la circulación de terceras armónicas de corriente, lo que puede provocar perturbaciones aplicables en este sentido; este circuito queda de todos modos siempre atenuado por el circuito cerrado por la Delta.

Las características principales de esta conexión son:

a) Adecuados en redes de distribución.

b) La delta permite camino a 3 armónicas.

c) La estrella con neutro permite alimentar cargas monofásicas.

5.5. Conexión Estrella - Zigzag (Yz)

Se ha visto que la conexión Yz presenta un grave inconveniente cuando existe desequilibrio de cargas en el secundario que se manifiesta como sobretensiones en el dado de AT. Para evitar esto se puede utilizar la conexión ZigZag en la secuencia como se muestra en la Figura 34. En la práctica solamente se cumplen el lado de B.T. para la z.

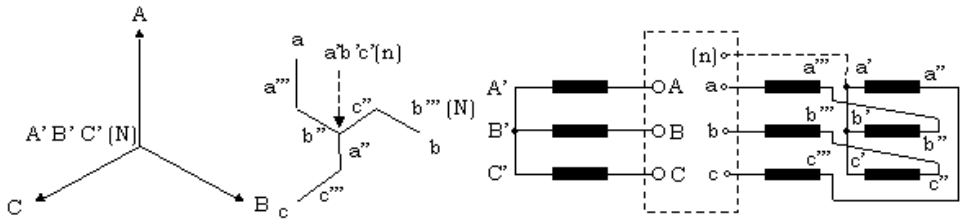


Figura 34: Conexión Yz, y su diagrama fasor.

Para formar la conexión z se debe subdividir el secundario en dos partes iguales, conectando como neutro los bornes de polaridad como se muestra en la figura; luego conectar en serie a cada rama de la estrella, las bobinas invertidas, de las adyacentes según un determinado orden cíclico.

En la Figura 35 se ha dibujado, para mayor claridad, solo una parte del diagrama fasor suficiente para obtener la relación entre las tensiones primarias y secundarias a partir de la razón de espiras del primario (H1) y del total del secundario.

De la Figura 35 se encuentra que la razón de transformación de las tensiones es 1.15 N_1/N_2 ($2/\sqrt{3}$ N_1/N_2) y por lo tanto mayor que si las unidades se hubiesen conectado en Yy (N_1/N_2) para igualdad de corrientes (y conductores) que la conexión Y.

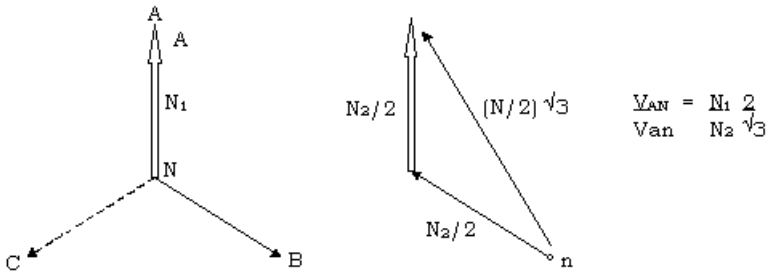


Figura 35: Relación entre las tensiones en la conexión Yz.

Todo lo anterior hace que la conexión Yz sea de mayor tamaño que una Yy para igual servicio.

5.5.1. Cargas desequilibradas

Esta conexión hace que la corriente que circula por cada fase cargada del secundario, afecte siempre por igual y a la vez a dos fases del primario. De este modo siempre, para cargas desequilibradas, hay corrientes por el primario que producen f.m.m. que se neutralizan con las del secundario, no produciendo desequilibrios en las tensiones.

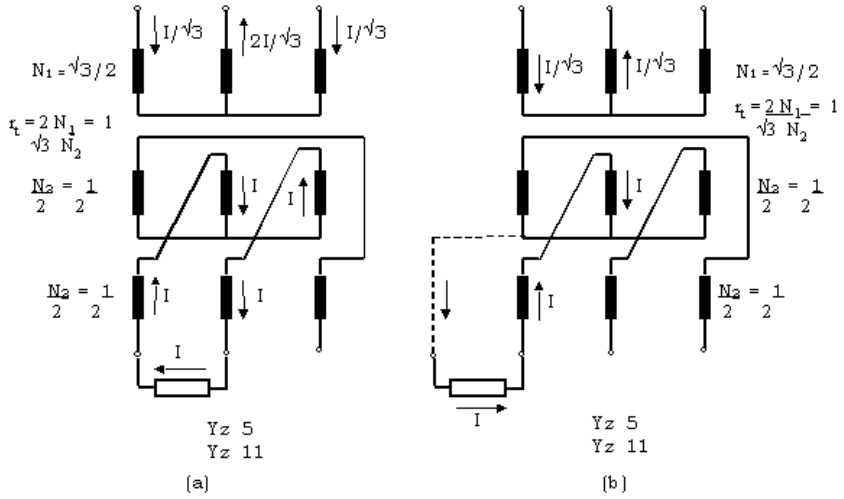


Figura 36: Cargas desequilibradas en la conexión Yz.

5.5.2. Armónicas de corriente, tensión y flujo en la conexión Yz

Se distinguen tres casos a destacar:

a) Conexión Yz sin neutro primario. En este caso, al no existir corrientes de excitación de tercera armónica, existirán terceras armónicas de flujo en cada fase, lo que provoca tensiones armónicas del mismo orden en el secundario.

b) b) Conexión Yz con neutro primario. En este caso, la tensión fase neutro en el secundario está libre de la tercera armónica, y por lo tanto de sobretensiones, al igual que la tensión entre fases. En la Figura 37 se muestra esquemáticamente el efecto (aumentado en el dibujo) de sumar tensiones en fase a cada uno de los segmentos de enrollado del secundario. No es diagrama fasor ya que hay tensiones de dos frecuencias.

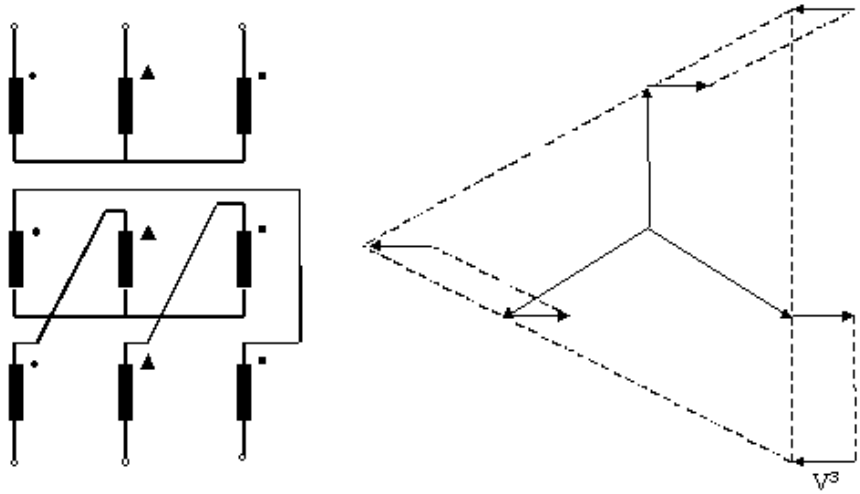


Figura 37: Esquema de las tensiones en el secundario. V^3 es la tensión de 3a armónica.

c) c) Conexión Yz con neutro secundario. Como ya se ha visto en a), aunque las tensiones en cada semidevanado secundario posean una componente de tercera armónica, la tensión resultante fase-neutro está libre de ella y, por lo tanto, es incapaz de producir corrientes de ese orden.

Sin embargo, si en el secundario existe una fuente o circuito capaz de generar corrientes de tercera armónica (válido para las corrientes de secuencia cero y de frecuencia fundamental), la impedancia que opone el transformador o esta corriente es la de cortocircuito (resistencia de enrollado y reactancia de fuga), ya que la unidad es incapaz de generar una contra f.e.m. neutro de esas características.

5.6. Conexión en Delta abierto, o conexión en V

5.6.1. Tensiones y corrientes

En algunos casos, por razones económicas, en instalaciones pequeñas susceptibles de ampliaciones futuras, puede ser conveniente equipar al principio dos transformadores monofásicos, cada uno de 1/3 de la capacidad total, haciéndolos funcionar en trifásico y añadiendo, cuando el consumo lo justifique, el tercer transformador.

Estos transformadores se pueden conectar según la Figura 38.

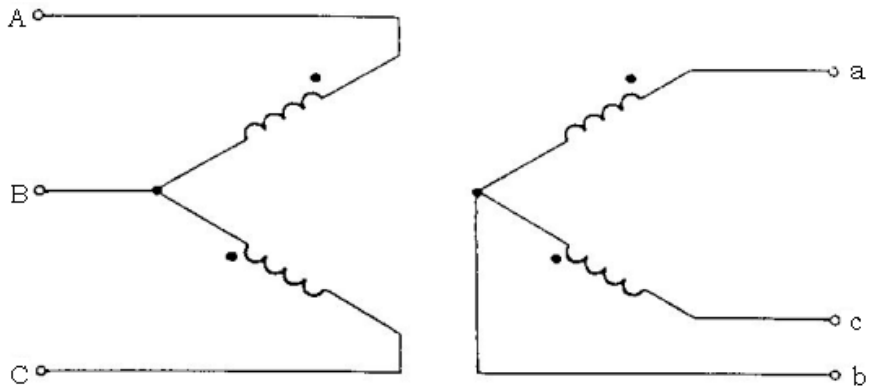


Figura 38: Conexión en V.

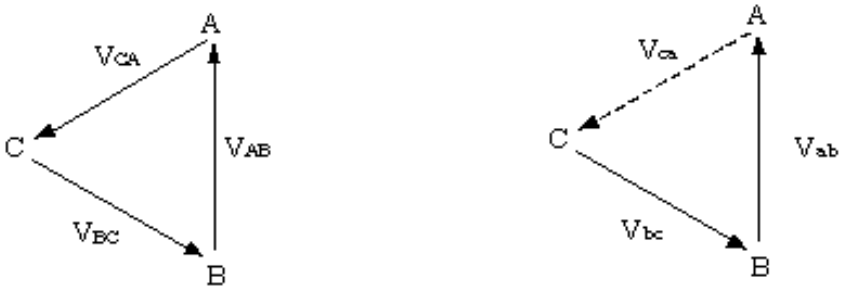


Figura 39: Diagrama fasor de las tensiones en la conexión en V.

En la Figura 39 se muestra que, si las tensiones son simétricas y equilibradas, las tensiones en el secundario también lo son.

Así, si tanto la alimentación como la carga son simétricas y equilibradas, la potencia activa será:

$$P_V = \sqrt{3} V_{ff} I$$

Donde I es la corriente por cada enrollado y V_{ff} el voltaje entre fases.

Por otra parte, la potencia máxima, en iguales condiciones, en la conexión Δ está dada por:

$$P_\Delta = \sqrt{3} V_{ff} (\sqrt{3} I)$$

Ya que la corriente en la línea en $\sqrt{3}$ veces la corriente por los enrollados.

De lo anterior de tiene que:

$$P_V = \frac{1}{\sqrt{3}} P_\Delta \text{ ó } P_V = 0.58 P_\Delta$$

y no $P_V = (2/3)P_\Delta$.

NOTA: No se emplean conexiones V en paralelo (con otras V), porque resulta más sencillo y económico completar la delta en una de ellas.

5.6.2. Cargas desequilibradas

Las cargas desequilibradas son siempre compensadas en el primario, sin que se produzcan sobretensiones debidas a sobreexcitación en algunas de las fases. En la Figura 40 se muestra una carga monofásica en el secundario, y su repartición de corrientes.

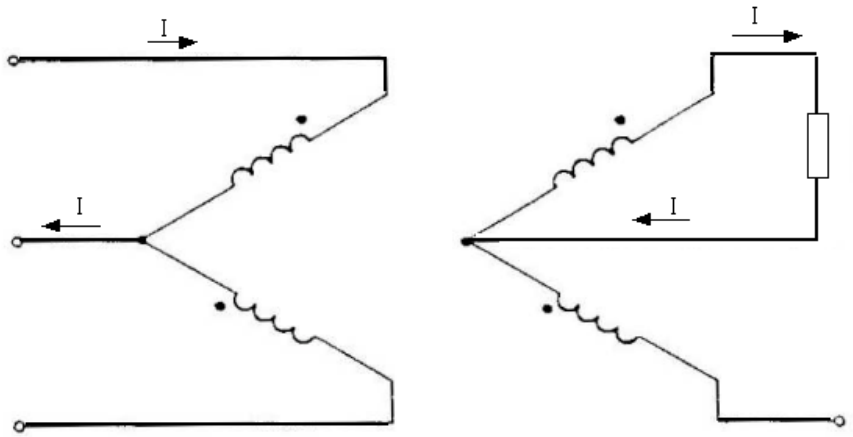


Figura 40: Carga monofásica en conexión en V, razón 1:1.

5.6.3. Armónicas en la conexión en V

Las componentes de tercera armónica, en la corriente de excitación, necesaria para crear el flujo sinusoidal, circulan por los devanados primario y secundario y, como están en fase, se suman en el conductor conectado al punto medio. No existen entonces sobretensiones, pero el efecto inductivo sobre las líneas de comunicación cercanas se hace sentir, aunque menos intensamente que cuando se usa la conexión Yy con neutros.

5.7. Conexión Estrella – Estrella con terciario en Delta (Yyd)

En sistemas de alta tensión tanto en el primario como en el secundario, son necesarios una o más de las siguientes condiciones:

- Neutro accesible para protección y/o cargas. Estabilidad del neutro, entre cargas desequilibradas.
- Ausencia de sobretensiones debidas a terceras armónicas en la tensión.
- Ausencia de corrientes de tercera armónica en las líneas.

- Un nivel de tensión adicional para servir consumos pequeños o auxiliares (comparados con la potencia de los devanados principales).

Para ello, es posible usar ventajosamente transformadores tres enrollados, conectados cada uno de ellos de modo trifásico. Normalmente los enrollados conectados en Y son ambos de A.T. (por ejemplo 220/110 kV), y el conectado en Δ de menor tensión, y de menor potencia (con conductores de menor sección que la correspondiente a la de un enrollado de potencia).

Ejemplo de lo anterior es un banco de transformadores monofásicos, cada uno con tres devanados, formando una conexión como la que se especifica a continuación:

Yy0d5, 220/110/13.2 kV

100 MVA en Yy, 10 MVA en Yd

En general, la delta proporciona un camino para la circulación de la tercera armónica de la corriente de excitación y, además, opera como estabilizadora de las cargas desequilibradas.

En la figura 41 se muestra la repartición de corrientes en la conexión Yyd para una carga secundaria monofásica.

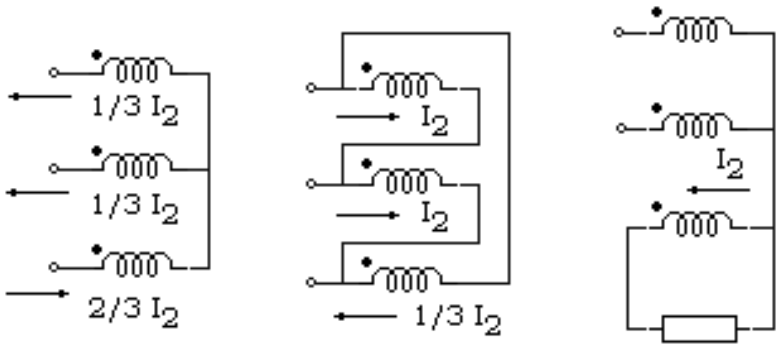


Figura 41: Carga monofásica en la conexión Yyd. Transformadores de razón 1:1.

5.8. Resumen de características de conexiones trifásicas

Con el fin de establecer comparaciones entre las distintas conexiones trifásicas de transformadores se puede, como primera aproximación, considerar cada lado (A.T o B.T) de modo independiente. Luego de lo anterior, se deben considerar la interacción de todos los lados del transformador (primario, secundario, terciario, etc.) y también los efectos especiales derivados de la configuración del circuito magnético (banco de transformadores monofásicos, transformadores trifásicos, tipo acorazado o columna).

En la Tabla 2 se resumen algunas de las principales características de las conexiones Y, Δ, y Z, consideradas independientemente, para enrollados de igual tensión y potencia.

	Y	D	Z
1.- Tensión fase–fase	V	V	V
2.- Tensión por devanado	$V/\sqrt{3}$	V	$V/\sqrt{3}$ y $V/(2\sqrt{3})$*
3.- Corriente de línea	I	I	I
4.- Corriente por devanado	I	$I/\sqrt{3}$	I
5.- Sección del conductor con $A/mm^2 = cte$	S	$S/\sqrt{3}$	S
6.- Número de espiras	N	$\sqrt{3}N$	$(2/\sqrt{3})N$
7.- Peso (y costo) del conductor	100	100	115.5
8.- 3as armónicas de corriente en la línea	Y (a tierra): **Si** Y (no a tierra): **No**	No	No
9.- Sobretensiones de 3a armónica en tensión fase–neutro	Y (a tierra): **No** Y (no a tierra): **Si**	No	No
10.- Uso de cargas desequilibradas	No	Si	Si
11.- Observaciones	1.- Recomendable para A.T. y cuando el neutro es necesario. 2.- Conexión Dy en distribución y en aplicaciones industriales.	1.- Recomendable para B.T. y altas corrientes. 2.- Equilibra cargas, suprime armónicas en la corriente de línea y en la tensión.	1.- Más caro que Y, D. 2.- Ventajas de D y neutro.
*: tensión por semidevanado			

Tabla 2: Cuadro resumen con características más importantes de conexiones Y, D, Z, consideradas aisladamente.

5.9. Conexión Scott

Esta conexión es muy poco utilizada hoy en día, pudiéndose encontrar en sistemas antiguos de ferrocarriles o bien en instalaciones industriales viejas, en donde se utilizaba alimentación bifásica para los consumos que se tenían.

La conexión Scott, o conexión T como también se le conoce, es un método a través del cual es posible cambiar un sistema trifásico e uno bifásico y viceversa. Esta conexión consiste en dos transformadores: uno con un tap central y el otro con un tap ubicado al 86.6 % del enrollado. De esta forma, el tap en la posición central del enrollado del primer transformador se conecta con el tap ubicado al 86.6 % del enrollado del segundo transformador. De esta forma, en los extremos del enrollado del transformador con el tap central se conectan dos de las tres fases del sistema trifásico y la tercera fase se conecta en el extremo superior del enrollado del otro transformador tal como se muestra en la figura 42.

De esta manera en los secundarios, conectados de la misma forma que se aprecia en la figura, se obtienen voltajes con un desfase de 90° entre ellos, quedando así determinado un sistema bifásico. Existen toros tipos de conexiones que permiten cambiar un sistema trifásico en uno bifásico, pero la conexión Scott se presenta como la más económica.

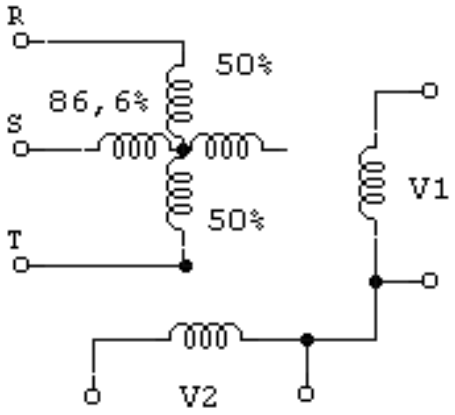


Figura 42: Conexión Scott.

En donde V_1 y V_2 están en cuadratura, y R, S y T son las tres fases del sistema trifásico.

Anexos

1. Tipos de transformadores trifásicos

Estructuralmente, las principales familias de transformadores trifásicos son las siguientes:

- Formados por bancos de transformadores 1φ.
- Transformadores 3φ propiamente tales:
  - Trifásico tipo núcleo.
  - Trifásico tipo acorazado.

1.1. Transformador trifásico tipo núcleo

Puede concebirse como la fusión de tres unidades monofásicas del tipo núcleo como se muestra en la Figura 2.

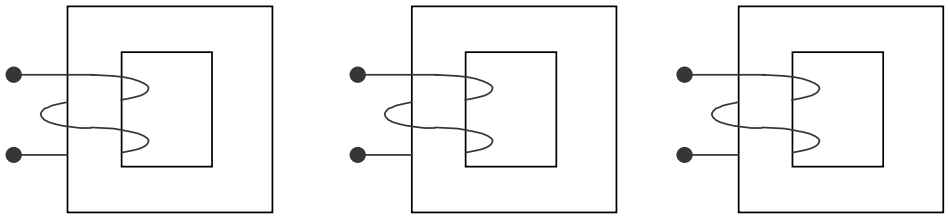


Figura 1: Tres unidades monofásicos del tipo núcleo.

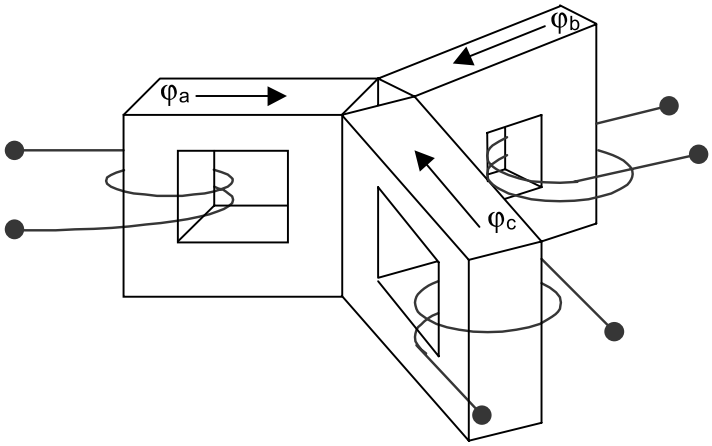


Figura 2: Fusión de las tres unidades 1φ tipo núcleo para formar el 3φ tipo núcleo.

En un sistema equilibrado, se tendrá que $\varphi_a + \varphi_b + \varphi_c = 0$, de esta forma no circulará flujo en la parte central como se muestra en la Figura 3. Una característica del transformador 3φ tipo núcleo, es que su circuito magnético no permite la circulación de 3as armónicas de flujo, de esta

forma la tensión en los devanados difícilmente se distorsiona. Un circuito equivalente se muestra en la Figura 4.

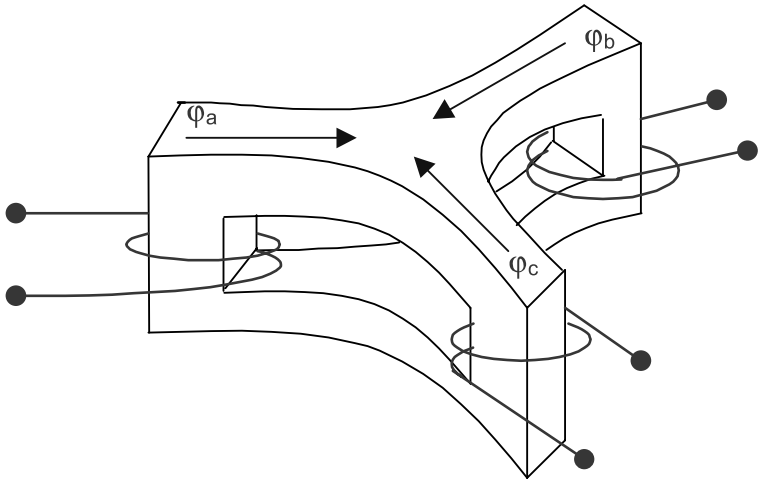


Figura 3: Flujo en los sistemas equilibrados.

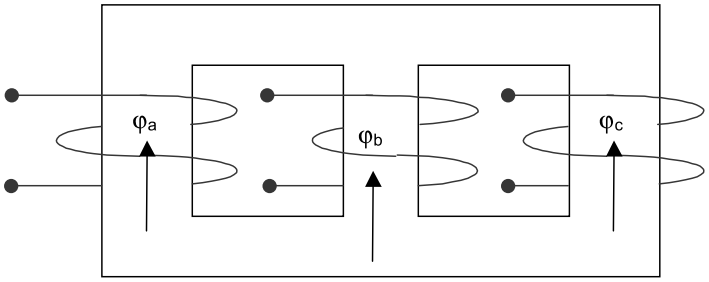


Figura 4: Transformador 3φ tipo núcleo.

1.2. Transformador trifásico tipo acorazado

En este caso corresponde a la fusión de tres unidades monofásicas del tipo acorazado como se muestra en la Figura 6.

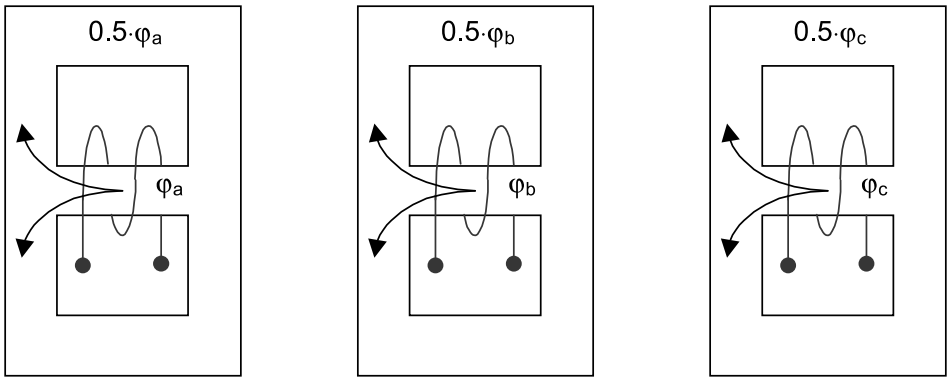


Figura 5: Tres unidades monofásicas del tipo acorazado.

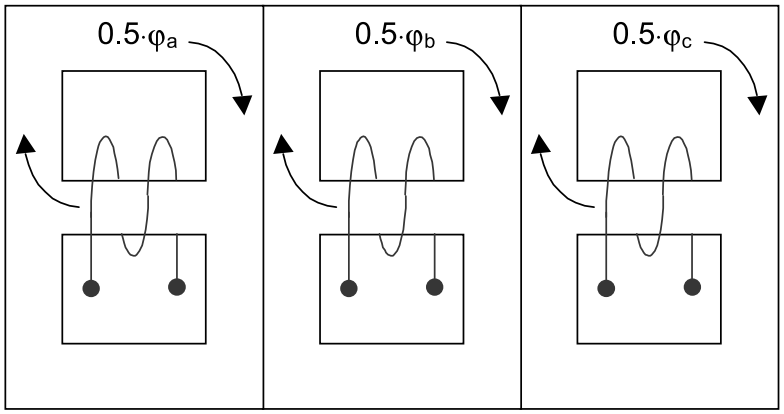


Figura 6: Fusión de las tres unidades 1φ tipo acorazado para formar el 3φ tipo acorazado.

Como se aprecia en la Figura 6 en las uniones se cumple que:

$$|\varphi_u^-| = 0.5|\varphi_a - \varphi_b| = 0.5\sqrt{3}|\varphi_a| \tag{1}$$

Es decir por las uniones circula $\sqrt{3}$ veces lo que circula en los otros sectores. Pero si se invierte la polaridad del enrollado central se tiene que por las uniones comienza a circular la suma de los flujos:

$$|\varphi_u^+| = 0.5|\varphi_a + \varphi_b| = 0.5|\varphi_a| < |\varphi_u^-| \tag{2}$$

De esta forma para lograr una mayor economía de fierro se colocan las bobinas del transformador central invertidas para tener una excitación invertida.

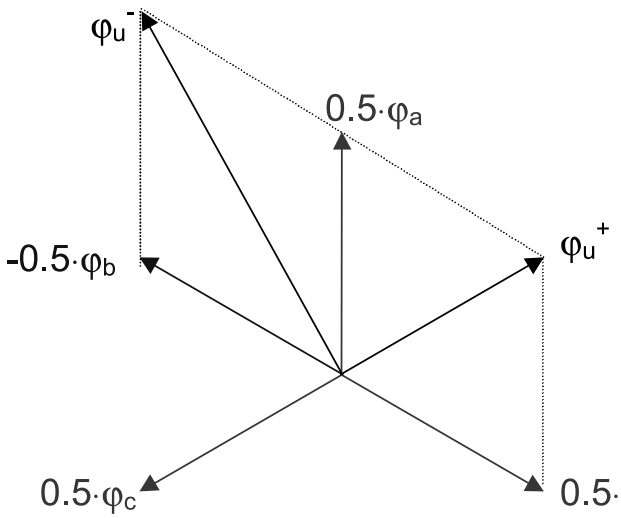


Figura 7: Diagrama fasorial del flujo magnético, donde se aprecia que $|\varphi_u^+| < |\varphi_u^-|$.

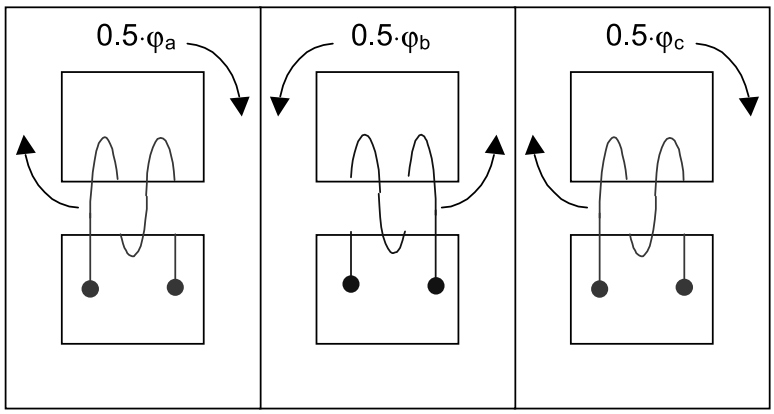


Figura 8: Transformador 3φ del tipo acorazado con la bobina central invertida.

2. Conexiones trifásicas de transformadores

Los transformadores 3φ pueden conectarse en estrella (Y), delta (Δ) o zigzag (Z) si se componen de dos o más enrollados.

Con Y y Δ pueden formarse cuatro tipos de transformadores:

i) YY (con uno, ninguno o ambos lados conectados a tierra).

ii) YΔ (con o sin estrella conectado a tierra).

iii) ΔY (con o sin estrella conectado a tierra).

iv) $\Delta\Delta$ ($\Delta\Delta$, VV).

3. Resolución de conexiones de transformadores trifásicas

3.1. El desplazamiento angular

En transformadores 1φ existe la posibilidad de que los voltajes inducidos del lado de alta y baja se hallen en fase o en contrafase. En el primer caso se trata de polaridad substractiva (los "puntos" del mismo lado), y en el segundo aditiva.

En transformadores 3φ, la posibilidad de "rotar" las fases y/o de combinar "estrellas" con "deltas", hace necesario definir un nuevo concepto: El desplazamiento angular.

Este concepto se define como el número de múltiplos de 30^o que el voltaje fase–neutro del lado de baja tensión atrasa al de del lado de alta tensión de la misma fase (pueden definirse también como los voltajes entre fases).

3.2. Notación utilizada

Existe una notación adecuada para representar el tipo de conexión del transformador y su desplazamiento angular.

Conexión	Delta	Estrella	Desplazamiento angular
H (alta tensión)	D	Y	$\theta°/30°$
X (baja tensión)	d	y	$\theta°/30°$

Tabla 3: Notación utilizada.

Observe que un desplazamiento de 12 es idéntico a uno de cero.

El desplazamiento angular está definido considerando polaridad **sustractiva** y secuencia de fases **positiva** (1–2–3, 2–3–1 ó 3–1–2).

3.3. Desplazamiento angulares posibles

Las conexiones Dd e Yy solo admiten desplazamientos angulares **pares**. Simbólicamente solo existirán las conexiones de la forma Dd$2n$ e Yy$2n$, con $n = 0, \ldots, 5$.

Del mismo modo las conexiones Dy e Yd solo admitirán desplazamientos angulares **impares**, es decir , conexiones de la forma Dy$(2n+1)$ e Yd$(2n+1)$, con $n = 0, \ldots, 5$.

En problemas prácticos es útil observar la relación fasorial en base al primer par de enrollados (con una bobina en alta y la otra en baja). Teniendo la relación fasorial, se construye el diagrama fasorial completo de acuerdo a la conexión y se deduce el desplazamiento. Como se ve lo esencial es la determinación de dicha relación.

4. Características de las conexiones Yy, Dy, Yd y Dd

a) Yy:

- Adecuados para altas tensiones.
- Sin neutros no permite alimentar cargas 1φ.
- Sin neutros no produce alteraciones importantes en redes de comunicaciones vecinas.
- Sin neutros no distorsiona la tensión fase neutro.

b) Dy:

- Adecuados en redes de distribución.
- La delta permite camino a 3^{a} armónicas.
- La estrella con neutro permite alimentar cargas monofásicas.

c) Yd:

- Típico en salida de centrales.
- Y apta en A.T. y d en B.T.
- No requiere necesariamente de neutro.
- Hay camino para 3as armónicas.

d) Dd:

- Sólo apto para bajas y medianas potencias.
- Enlace entre redes de AT y de distribución.
- No puede alimentar cargas 1φ.
- Puede funcionar con una unidad fallada (VV).

4.1. Conexión en paralelo de transformadores 3φ en paralelo

Las condiciones son:

a) Las mismas que las condiciones monofásicas (ver Apunte de Transformadores Monofásicos).

b) Igual desplazamiento angular.

4.2. Solución de redes trifásicas

a) **Sistema equilibrado:** Se transforma a un sistema monofásico y se resuelve para una fase. Las otras dos tendrán resultados idénticos para impedancias y diferentes sólo en ángulo para voltajes y corrientes (-120^o y -240^o). Deben convertirse las conexiones Δ a Y equivalentes ($Z_\Delta = 2Z_Y$).

b) **Sistema desequilibrado:** Se resuelve a través de transformación de coordenadas simétricas o de Fortescue (el sistema 3φ desequilibrado se transforma en tres sistemas equilibrados).

5. Ejemplos de conexiones de transformadores trifásicos

5.1. Ejemplo 1: Diagramas fasoriales y conexión 3φ YΔ

Los diagramas fasoriales para las conexiones Estrella y Delta se muestran en la Figura 9. Ambos diagramas fasoriales de tensiones resultan de una alimentación 3φ, simétrica y equilibrada.

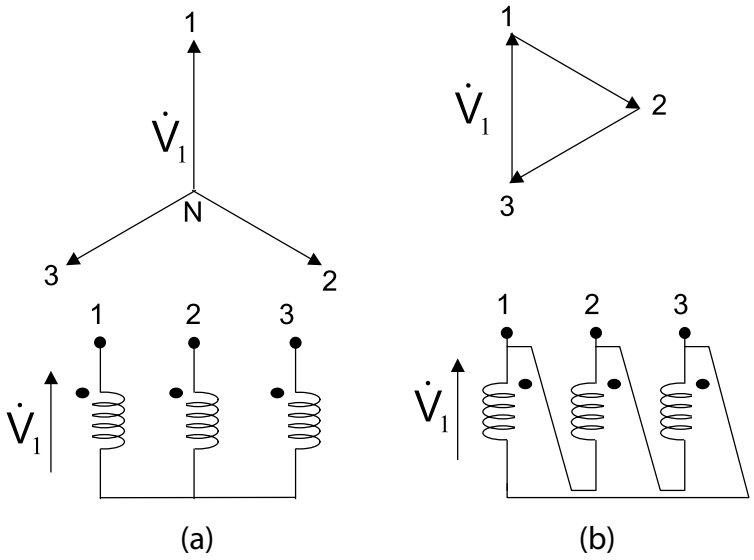


Figura 9: Diagramas fasoriales de tensiones para (a) la conexión estrella y (b) la conexión delta.

En la Figura 10 se muestran formas de hacer una conexión YΔ. Ambas formas de realizarla son correctas, pero se recomienda la forma (b), al ser más clara para visualizar.

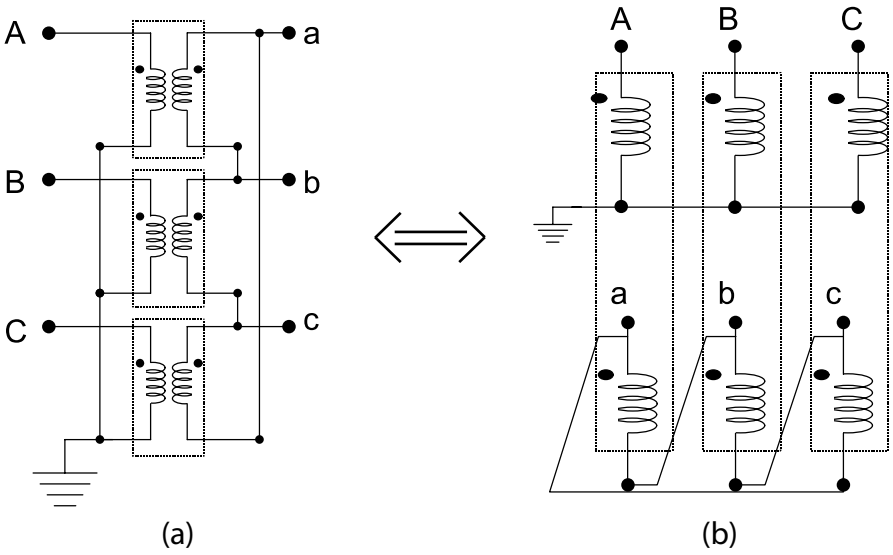


Figura 10: Esquemas de conexión estrella – delta de un transformador.

5.2. Ejemplo 2: Determinar el tipo de conexión

Considere la conexión que se muestra en la Figura 11.

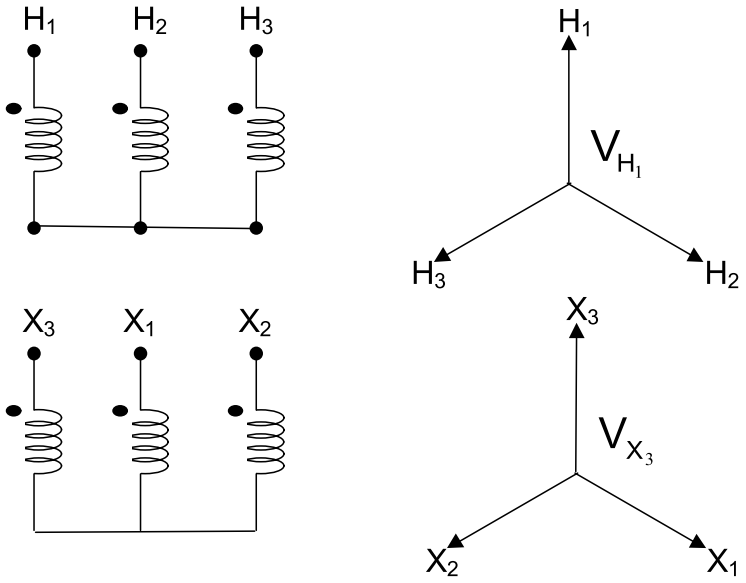


Figura 11: Conexión y diagramas fasoriales para una conexión desconocida.

Observe que en la misma pierna satisface que que $H_1 \sim X_3$ (son proporcionales, debido a que la razón de vueltas es desconocida). Esto implica que el vector X_3 es proporcional a H_1, por lo que ambos apuntan en la misma dirección (note que los puntos indica la punta de la flecha). Análogamente se observa que H_2 es proporcional a X_1 y H_3 es proporcional a X_2. Se deduce viendo el desfase entre H_1 y X_1 que este último lo atrasa en 120°. De esta forma la conexión anterior corresponde a un transformador 3φ Yy4.

5.3. Ejemplo 3: ¿Qué conexión se implementa en el esquema

Observe los embobinados y los puntos de la Figura 12. Lo esencial en este tipo de problemas es hallar una relación entre los fasores X_i en función H_i. Es decir encontrar cuanto se ha atrasado el fasor de baja con respecto al de alta.

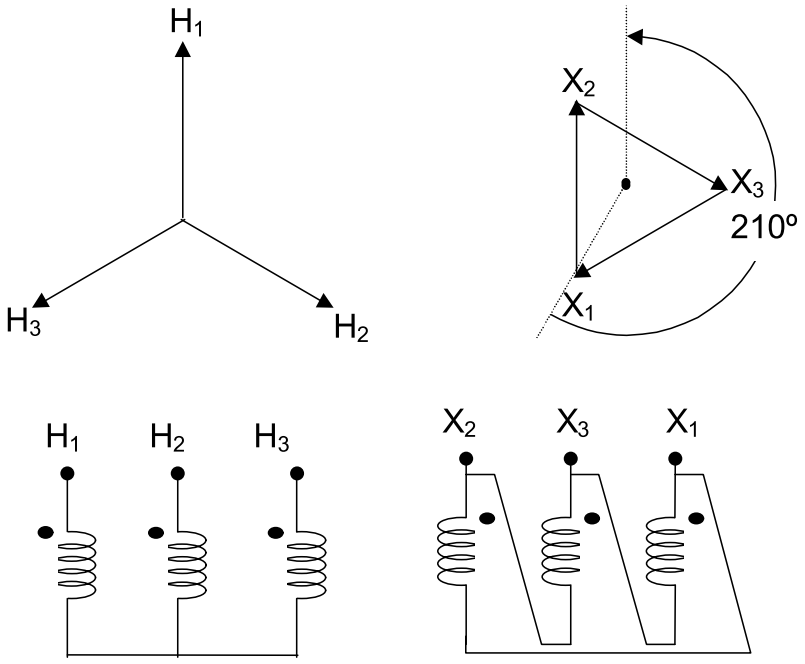


Figura 12: Conexión y diagramas fasoriales para una conexión desconocida.

En el caso de arriba, a partir de las orientación y conexiones del primer par de bobinas se puede deducir que H_1 es proporcional a $X_2 - X_1$ (notar que la flecha que une la punta de X_1 con la punta de X_2 es paralela a H_1 en el diagrama fasorial). Esto permite deducir que el desplazamiento será de 210º al llevar a un diagrama todos los fasores. De esta forma la tensión X_1 atrasa a H_1 en 210°, es decir un desplazamiento de 7. Por lo tanto la conexión es Yd7.

5.4. Ejemplo 4: Construir un Yy6

Lo que interesa en este caso es que X_1 atrase en 180° a H_1. Lo que es lo mismo que H_1 sea proporcional a $-X_1$, luego para conseguir solo basta invertir el punto, como se muestra en la Figura 13.

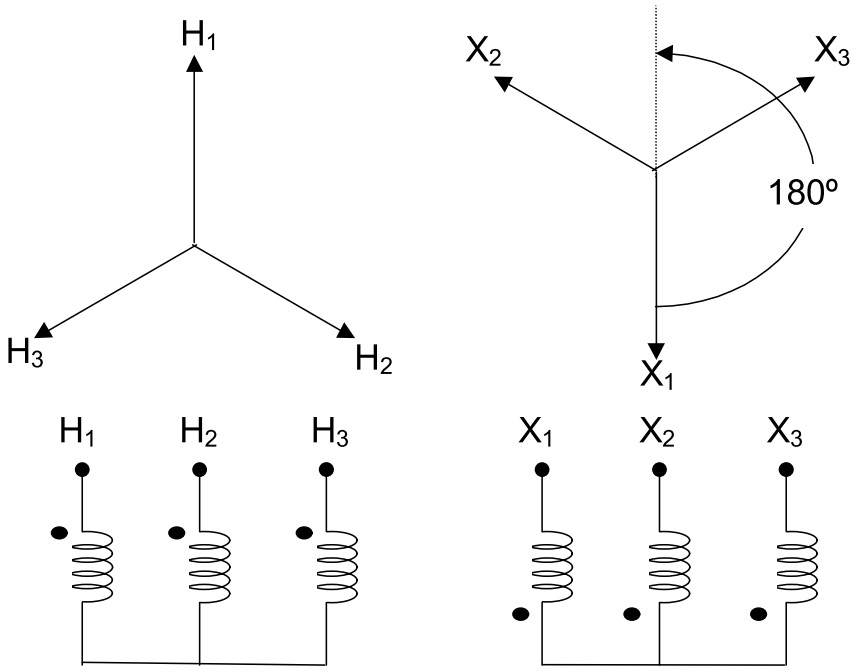


Figura 13: Conexión y diagramas fasoriales para un Yy6.

5.5. Ejemplo 5: Determinar el tipo de conexión

Observe las conexiones de la Figura 14. A partir del primer par de embobinados se ve que $H_1 - H_2$ es proporcional a $X_3 - X_2$ (para recordarlo mnemotécnicamente, suponga que las bobinas son los vectores con sus extremos (punta de la flecha) en sus terminales con punto).

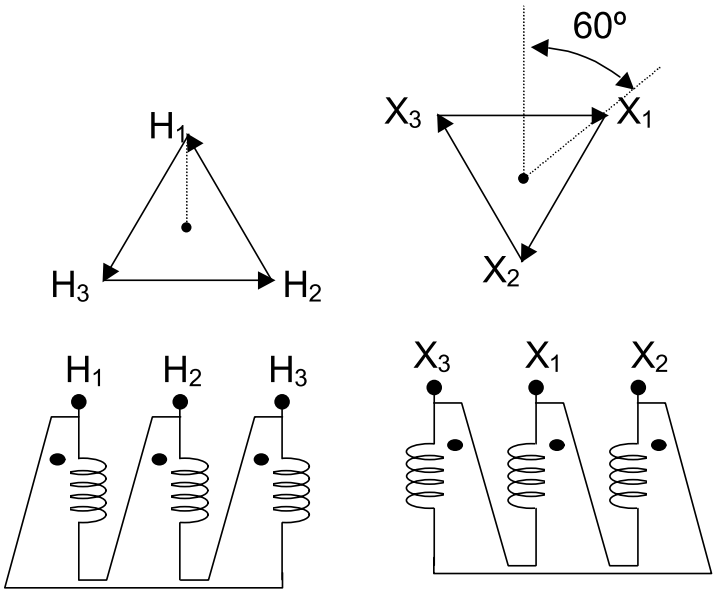


Figura 14: Conexión y diagramas fasoriales para una conexión desconocida.

Como la conexión es Dd, al llevar esa relación a un diagrama y ver el desfase entre los vectores fase–neutro se obtiene que el desplazamiento es de 2. De esta forma corresponde a una conexión Dd2.

5.6. Ejemplo 6: Implementar una conexión Dy3

Interesa implementar un ángulo de 90°, es decir que X_1 atrase en 90° a H_1. Observando el diagrama fasorial de la Delta base elegida, es equivalente que X_1 atrase en 90° a H_1, a que X_1 sea proporcional (o paralela) a H_2-H_3. De esta forma en una misma pierna colocamos a X_1 con H_2-H_3.

Realizando el procedimiento análogo para X_2 y X_3 se obtiene lo mostrado en la Figura 15.

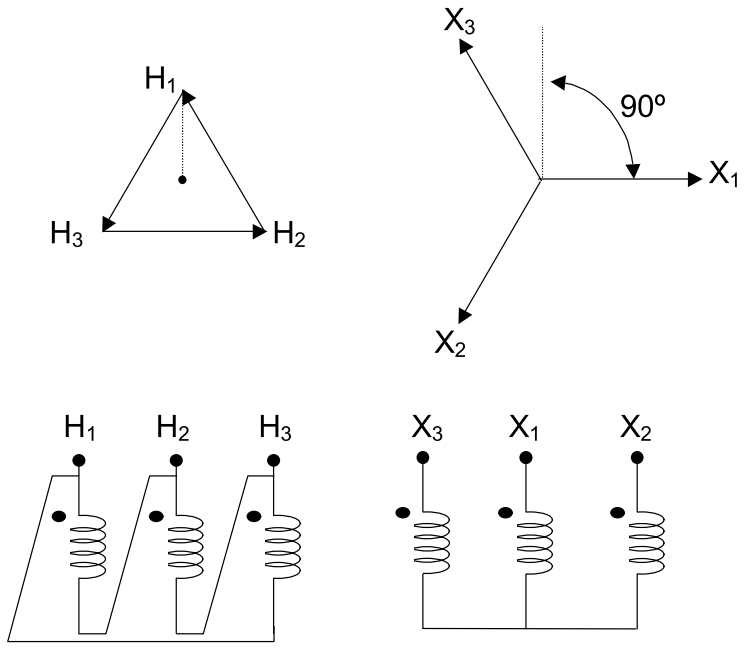


Figura 15: Conexión y diagramas fasoriales para un Dy3. Note que en la pierna central se tiene a $H_2 - H_3$ en el lado de alta, y a X_1 en el lado de baja.

5.7. Ejemplo 7: Otras conexiones

A modo de ejercicio, intente obtener la mayor cantidad de diagrama de conexiones tan solo a partir de las notaciones. Puede comparar sus resultados con los de la Figura 23 y 24 de este documento.

Referencias

[1] R. Bean, N. Chackan, H. Moore and E. Wentz, *Transformers for the Electric Power Industry*, Mc Graw Hill, 1959.

[2] ASA Standard C57, American Standard Requirements, *Terminology and Test Code for Distribution, Power and Regulating Transformers and Reactors other than Current-limiting Reactors.*

[3] Mueller, *Alternating Current Machines*, Mc Graw Hill, 1959.

[4] Langsdorf, *Teoría de las máquinas de corriente alterna*, Mc Graw Hill, 1971.

[5] Massachusetts Institute of Technology, *Magnetic Circuits and Transformers*, M.I.T. Press, 1965.

[6] E. Fitzgerald, *Teoría y Análisis de las Máquinas Eléctricas*, Editorial Hispano Europea, 1980.

[7] J. Thaler, *Máquinas Eléctricas: Estado Dinámico y Permanente*, Editorial Limusa-Wiley, 1966.

[8] L. W. Matsch, *Máquinas Electromecánicas y Electromagnéticas*, AID, 1974.

[9] E. Ras, *Transformadores de potencia, de medida y de protección*, Marcombo, 1972.

[10] Norma IEC (International Electortechnical Commission), publication 76, Second Edition, *Power Transformers*, 1967.

[11] Norma VDE (Normas Alemanas), VDE 0532/8.64 9.

[12] J. Corrales, *Teoría, Cálculo y Construcción de Transformadores.* Escuela del Técnico Electricista, Tomo VII, Editorial Labor, 1965.

[13] Apuntes del curso Máquinas Eléctricas, Dixon, J.

[14] Zenteno, M. y Legarraga, I., *Protecciones de Sistemas Eléctricos.* Colegio de Técnicos de Chile, 1960.

[15] Brand, L. y Moncada, I., *Protecciones de Sistemas Eléctricos*, editado por Hugo González , 1976.

[16] Norma VDE 0414/7.56. *Rules for Instrument Transformers.*

[17] Norma USA Standard, C57.13-1968, *Requirements for Instrument Transformers.*