

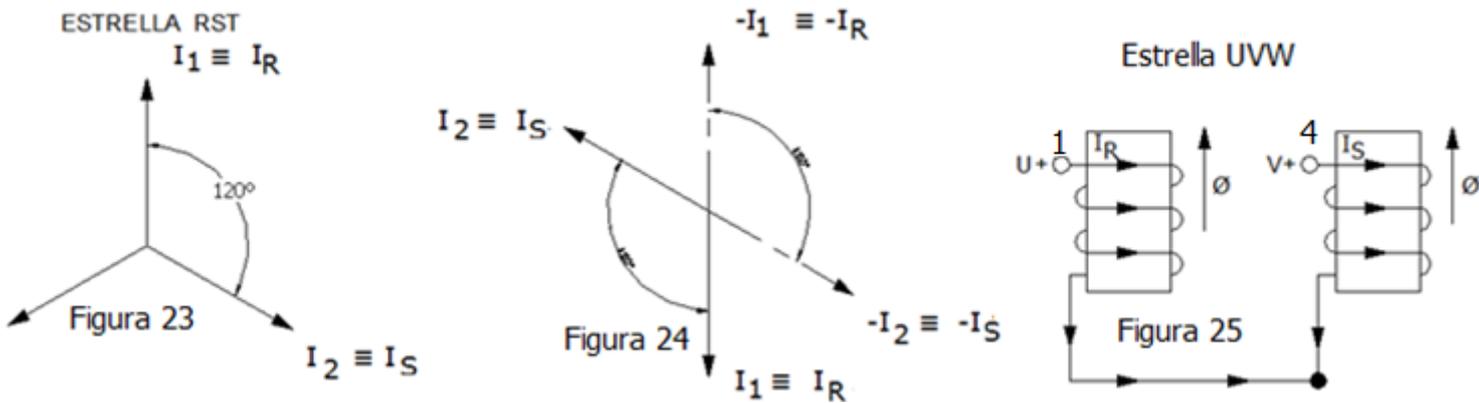
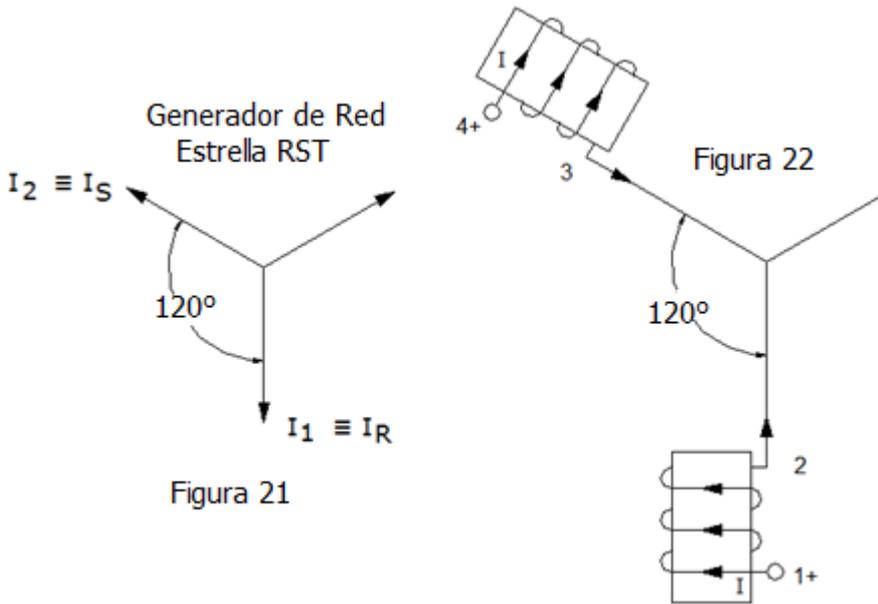
TRANSFORMADORES

POLARIDAD Y DESFASE DE TRANSFORMADORES - 2ª PARTE

Desfase de 120°

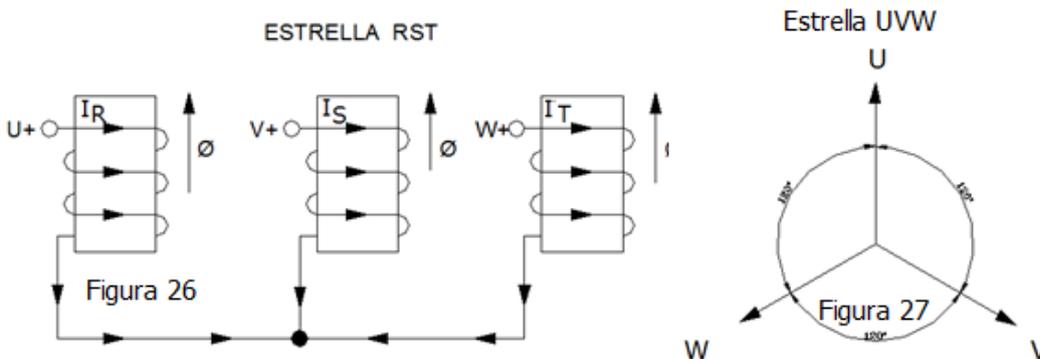
Si las bobinas estuviesen conectadas a dos fases de un sistema trifásico, las corrientes de alimentación estarían desfasadas 120° (Figura 21)

Haciendo el mismo análisis anterior, es decir, eligiendo como borne + al 4 (Figura 22), las corrientes de oponen (se restan vectorialmente), están conectadas en *serie sustractiva*, por consiguiente quedan *desfasadas 120°*- Figura 23- o lo que es lo mismo representadas según Figura 24. Ordenando la Figura 22 de otra manera queda la Figura 25. De ella se deduce la siguiente aplicación:



Aplicación:

Si se tienen tres bobinas devanadas iguales, *conectando los principios o fines entre sí* (Figura 26), se obtiene una *conexión estrella* (Figura 27). Las flechas de polaridad (vectores) llegan o salen del nudo.

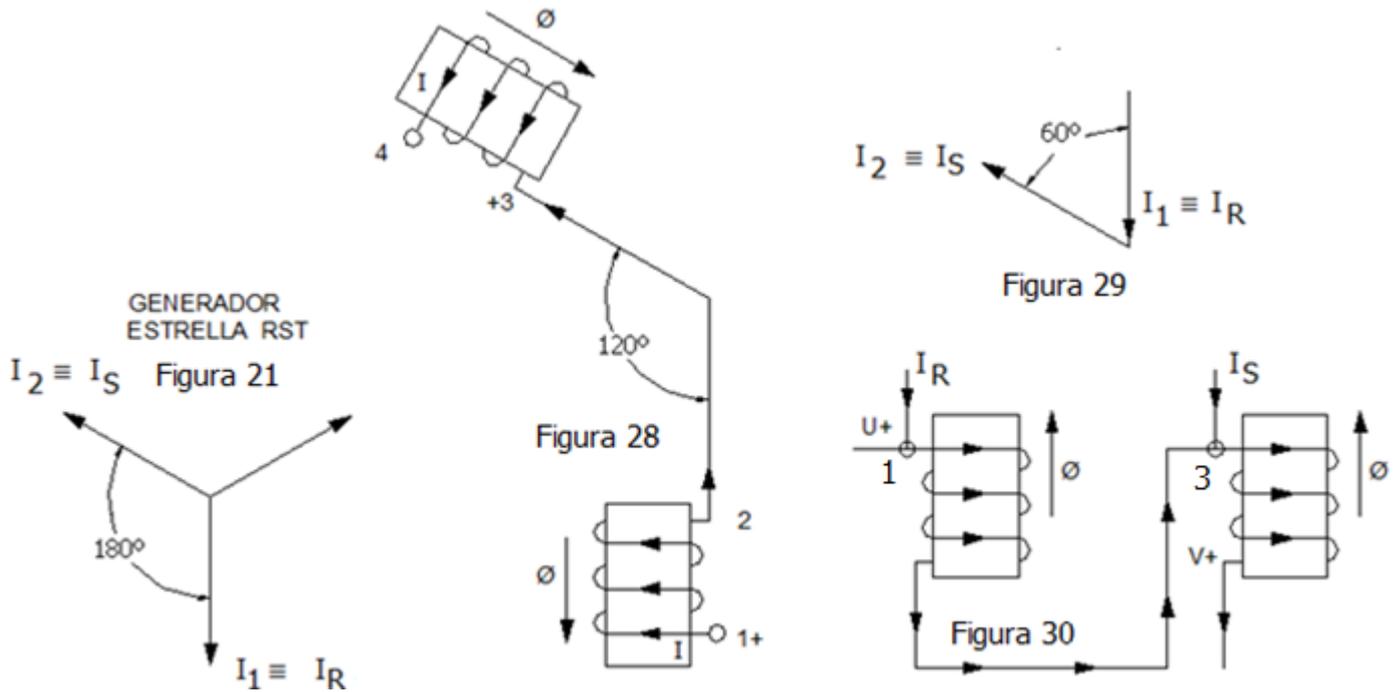


TRANSFORMADORES

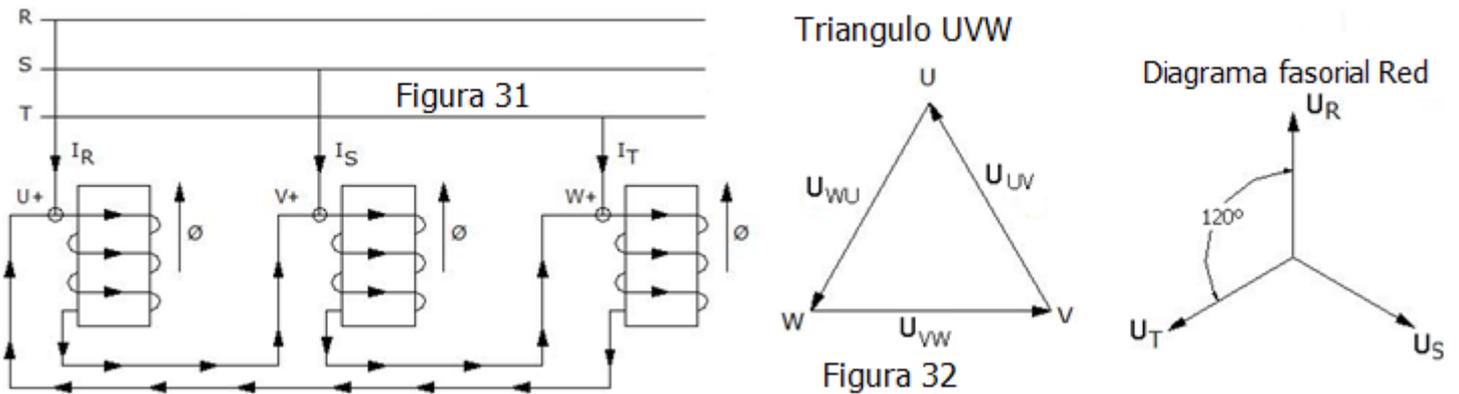
POLARIDAD Y DESFASE DE TRANSFORMADORES - 2ª PARTE

Desfase de 60°

En las mismas condiciones iniciales anteriores (Figura 21), pero eligiendo como borne + al 3 (Figura 28)



Las corrientes quedan en igual sentido (suma vectorial) quedan conectadas en *serié aditiva*, por lo tanto a 60° (Figura 29). Ordenando la Figura 28 quedaría como la Figura 30. De esta última se obtiene la siguiente



Aplicación

Dadas tres bobinas igualmente devanadas, conectando el fin de una con el principio de la siguiente (Figura 31) se obtiene la conexión triángulo (Figura 32).

Nótese que las espiras conectadas a los bornes 1 y 4 (en el desfase de 120°) y 1 y 3 (en el desfase de 60°) tienen el mismo sentido de arrollamiento respecto al núcleo, es decir, igual polaridad.-

Otra Aplicación, la conexión Zig-Zag:

Aplicaremos los dos conceptos anteriores a la denominada "conexión zig zag". Esta consiste en dividir el bobinado secundario de cada columna de un transformador trifásico en dos partes iguales y conectar cada mitad, en serie con una mitad del bobinado de la columna siguiente y así sucesivamente (Figura 33). Esto da la posibilidad de conectar la bobina de una columna (U_{UL}) a uno u otro borne de la bobina de la columna siguiente (U_{NV}). Si la elección fuese errónea, el devanado se quema.-

TRANSFORMADORES

POLARIDAD Y DESFASE DE TRANSFORMADORES - 2ª PARTE

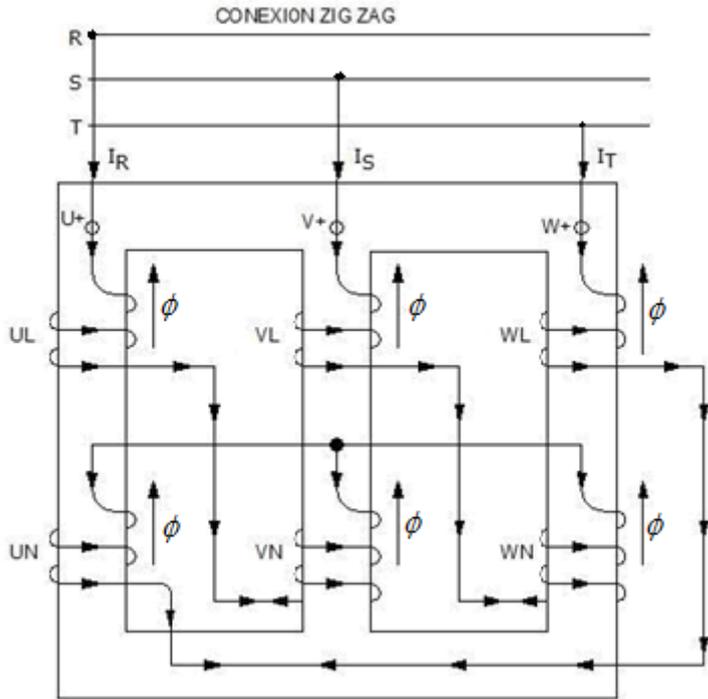


Figura 33

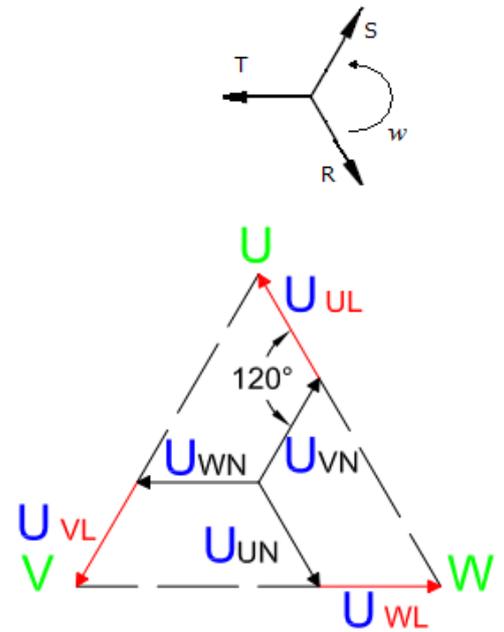


Fig. 34

Aplicamos los conceptos de polaridad: (1º) fijamos un sentido para el flujo en las tres columnas, (2º) determinamos las corrientes, (3º) si conectamos el fin de U_{UL} con el fin de U_{VN} , quedan unidas en serie sustractiva (fin con fin), luego las bobinas están a 120° (ver figura 25); (4º) repitiendo la conexión para las demás bobinas y uniendo los principios de U_{UN} , U_{VN} y U_{WN} , para determinar el neutro, se obtiene la conexión correcta en zig zag.-

Para el trazado del diagrama vectorial se procede de la siguiente manera

- 1-º Las bobinas U_{UN} , U_{VN} y U_{WN} , tienen conectadas sus principios entre sí (neutro) y están en columnas a 120° , por consiguiente forman una estrella, luego se pueden trazar sus vectores a 120° entre sí.-
- 2º) U_{UN} está en serie sustractiva con U_{WL} por tanto desfasadas 120° . Al extremo de U_{WL} se encuentra el borne W.

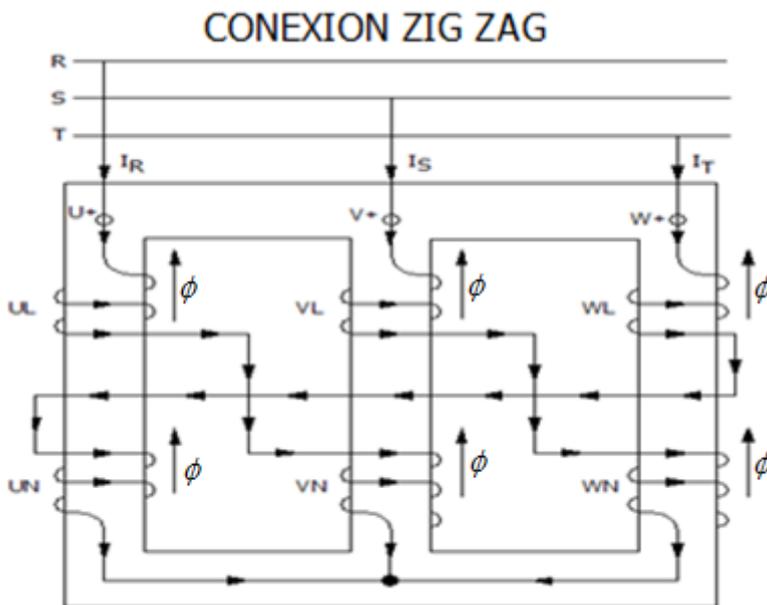


Figura 35

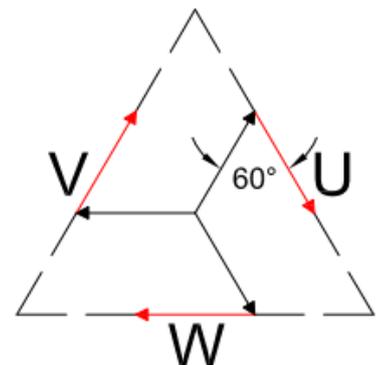
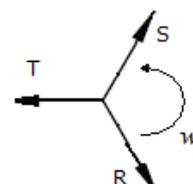


Fig. 36



TRANSFORMADORES

POLARIDAD Y DESFASE DE TRANSFORMADORES - 2ª PARTE

3º) De la misma forma se procede para las otras dos columnas.

4º) U_{UN} y U_{UL} son paralelos por pertenecer a la misma columna.

5º) Los sentidos de los vectores U_{UN} y U_{UL} son opuestos porque las corrientes en uno van de neutro a borne y en el otro de borne a neutro.-

Si la conexión se hubiese efectuado al otro borne posible (Figura 35), habrían quedado unidas en serie aditiva (fin con principio) lo que determinaría un desfase de 60° (ver Figura 29) y el diagrama vectorial sería el de Figura 36.

Las tensiones entre bornes serían menores, aunque las bobinas que componen el sistema sean iguales, entonces al aplicarles la tensión que correspondería $\sqrt{3} \cdot U_f$, que es mayor, quemaría los devanados.

Aplicación:

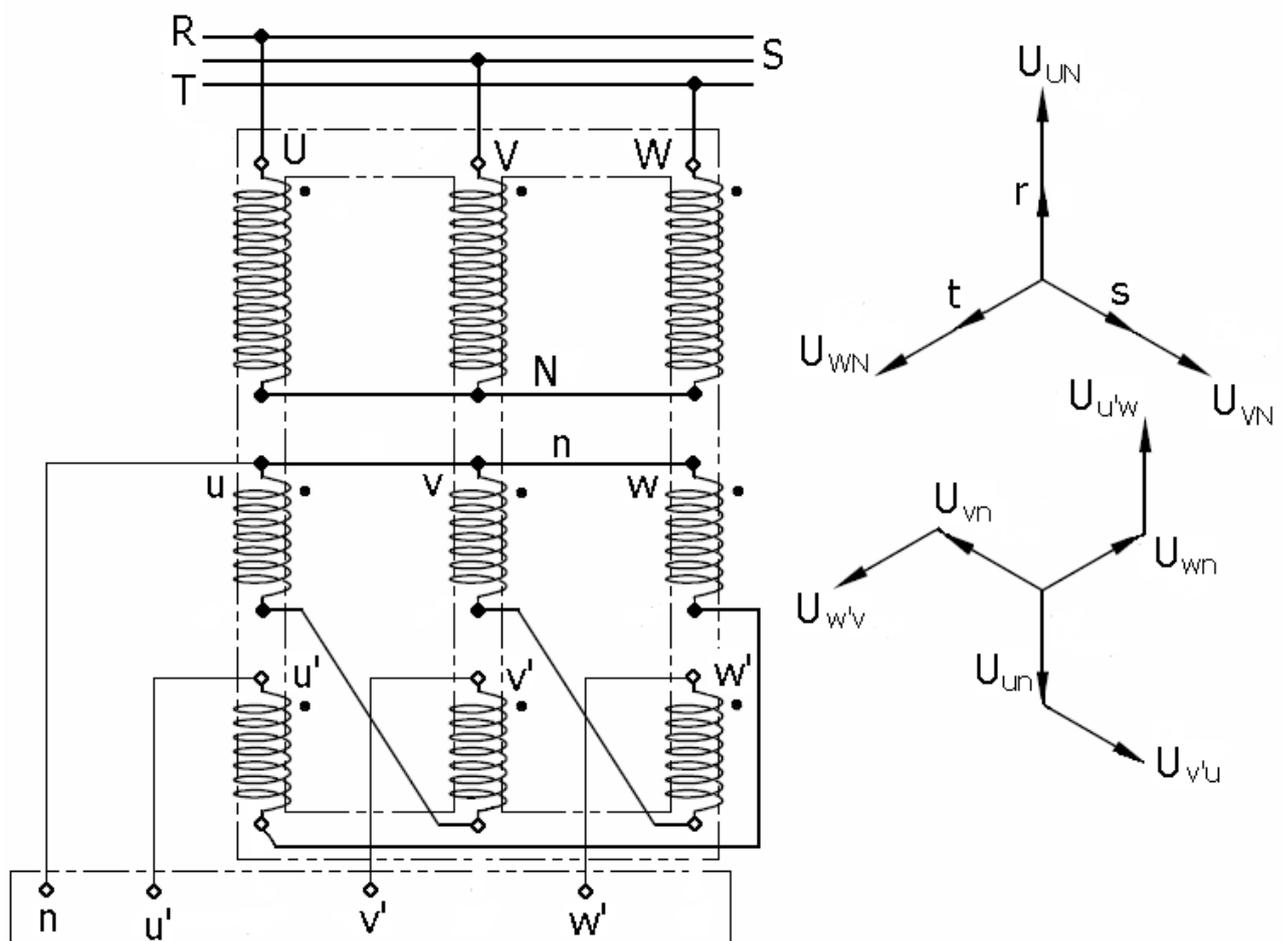
1º) La conexión zig-zag se usa en transformadores reductores de tensión, conexión Yz, para distribución, dado que provee de neutro y equilibra las cargas, en un consumo desequilibrado, porque los A.vtas secundarios afectan a dos columnas simultáneamente.

2º) Autotransformadores para neutro artificial.

3º) Autotransformadores, relación 1:1, para protección en caso de tierra accidental de un conductor en líneas trifásicas.

Otro Ejemplo de Conexión Zig Zag para practicar es el siguiente. Tener en cuenta que para que no se queme el bobinado, la conexión debe ser siempre sustractiva y con cualquier bobinado de las otras dos columnas del transformador, solo diferirán en el diagrama vectorial final, pero así puede funcionar sin riesgo la conexión. Ejecute como ejercitación la otra posibilidad del ejemplo, cambie luego de ubicación el neutro del secundario, por ejemplo uniendo los bornes no punto de u, v y w y repita el ejercicio.

Zig - Zag



TRANSFORMADORES

POLARIDAD Y DESFASE DE TRANSFORMADORES - 2ª PARTE

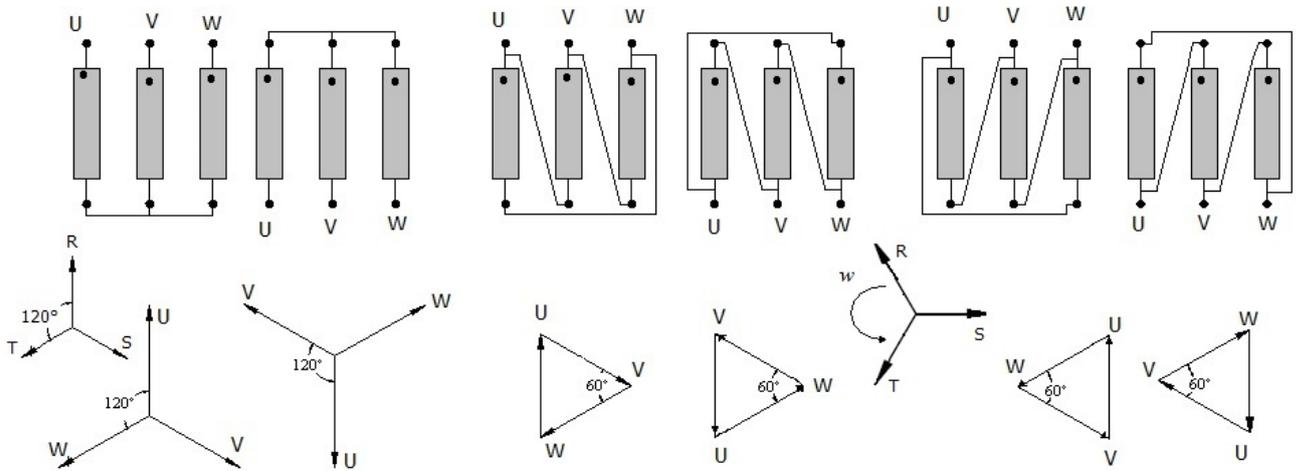
4.- Desfase entre sistemas

Los devanados de las tres columnas de un transformador trifásico se pueden unir entre sí, formando tres sistemas de conexión principales: triángulo, estrella y zig-zag.

Además tenemos dos juegos de devanados trifásicos, uno primario y otro secundario, que pueden tener cada uno un sistema de conexión.

Las polaridades y desfases, por este hecho, están ya definidas. Pueden resultar alteradas de acuerdo a como se conecten entre si los devanados de cada columna. Porque, así, las conexiones triángulo y zig-zag admiten cuatro formas de realizarse y la conexión estrella, dos (Figura 37).

Esquema: en la Figura los puntos de la polaridad están arriba de cada bobina y el diagrama fasorial de la red es RST conectado a U, V y W, para todos los ejemplos (observar la Figura en la conexión estrella). Para el triángulo es el RST girado 30° en sentido anti horario, (como se muestra) y para el Zig Zag es el mismo que para la conexión estrella.-



Dos posibilidades para la Conexión Estrella y cuatro alternativas para la conexión Triángulo con sus Diagramas

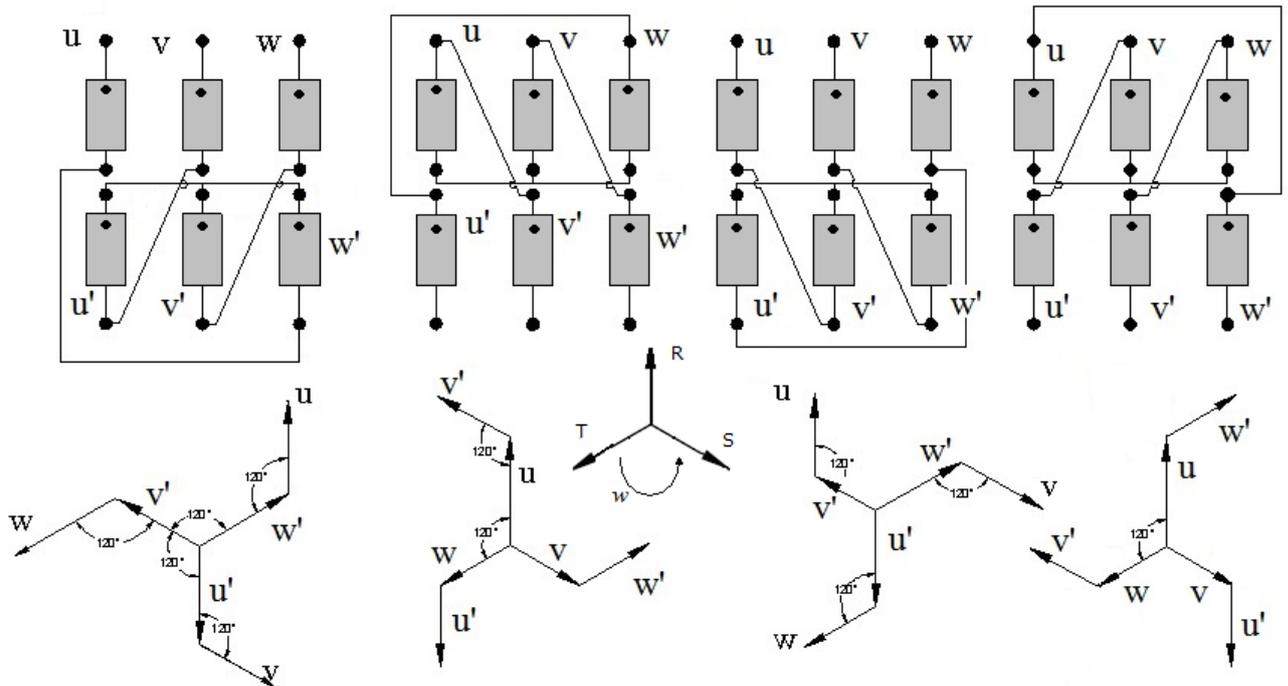


Figura 37 - Cuatro posibilidades o alternativas de conexión para el Zig Zag y sus diagramas Fasoriales

Estas posibilidades, aplicadas al primario y secundario, originan una polaridad y desfase determinados, entre ellos.

TRANSFORMADORES

POLARIDAD Y DESFASE DE TRANSFORMADORES - 2ª PARTE

Para designar la conexión se usa una letra mayúscula para el primario (lado de Alta Tensión) y minúscula para el secundario (lado de B.T.), empleando las letras D y d respectivamente para el triángulo, Y e y para la estrella; Z y z para el zig-zag. El ángulo de desfase entre primario y secundario se representa por un número que, en la designación C.E.I., coincide con el de la hora exacta en un reloj. El ángulo de desfase corresponde al ángulo que forman las agujas a esa hora (Figura 38).

Queda así designado, con dos letras y un número, el "grupo" al cual pertenece el transformador. Por ejemplo, un transformador conectado en triángulo en el primario, y estrella en el secundario y desfase de -30° pertenece al grupo: Dy11.

INDICE	POSICIÓN AGUJAS	ANGULO
0		0°
6		180°
5		150°
11		330°

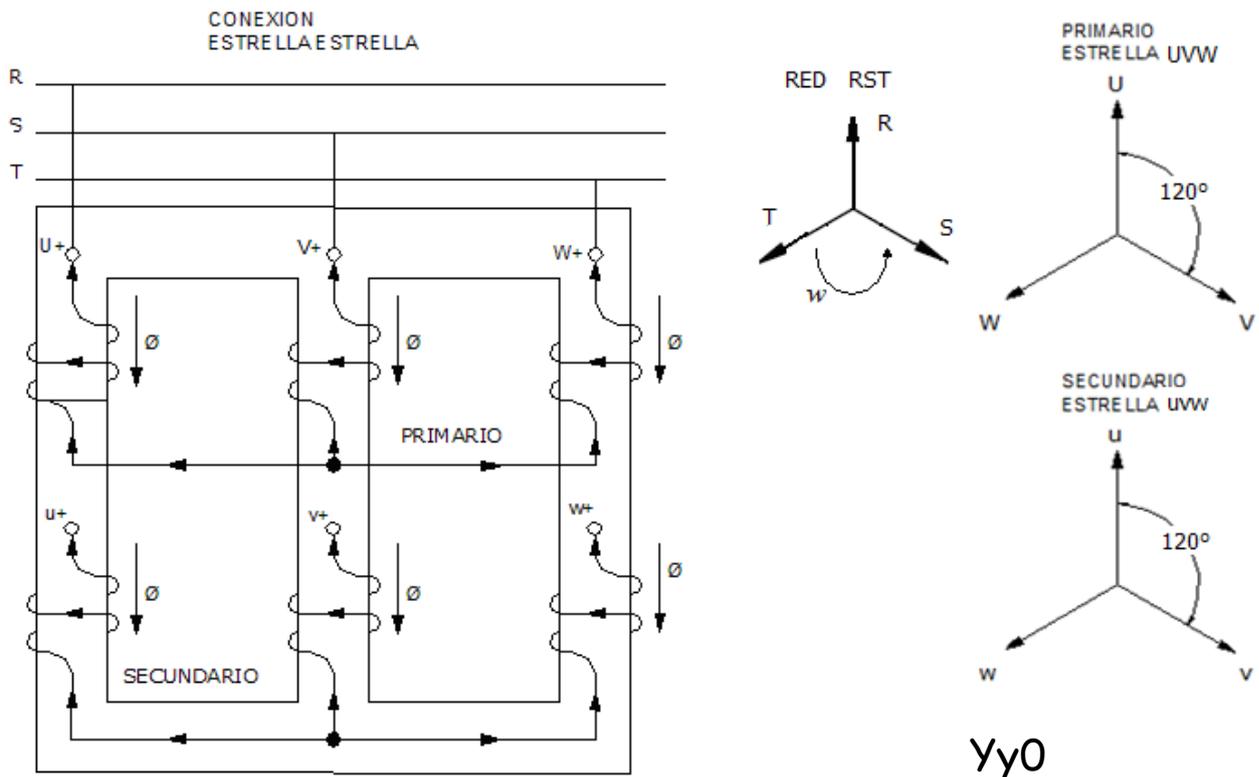
Figura 38

Es de interés destacar que:

En un transformador ya construido, *si se cambia la alimentación* de un lado al otro, es decir alimentado por el primario se pasa a alimentarlo por el secundario o viceversa, *cambia el desfase* de la máquina. Ejemplo: Un transformador Dy11 pasa a ser Yd1.

Ejemplos:

Ejemplo A) Dada una conexión estrella-estrella (Figura 39), determinar el grupo al cual pertenece y su diagrama vectorial:



TRANSFORMADORES

POLARIDAD Y DESFASE DE TRANSFORMADORES - 2ª PARTE

Figura 39

b) Diagrama Vectorial

a) Disposición práctica

- 1º) Elegimos arbitrariamente la polaridad del sistema de terminales primarios, conviniendo el siguiente sentido como positivo: $\circ \leftarrow \oplus$
- 2º) Queda determinado el sentido (+) también para el flujo Φ .
- 3º) Se determina la polaridad de los bornes secundarios.
- 4º) Se traza el diagrama vectorial primario, en posición arbitraria, puesto que lo que define el desfase es la posición relativa entre los sistemas primario y secundario.
- 5º) La dirección en el devanado u es la misma que en el U por estar concatenados por el mismo flujo, y en el sentido coincidente por idéntica polaridad de los terminales o sea terminales homólogos (flechas de polaridad en el esquema). Por tanto se traza el vector U_{ou} paralelo al vector U_{oU} y en el mismo sentido. Se procede igual para las otras columnas.
- 6.) El ángulo entre U_{ou} y U_{oU} es 0° , luego el grupo es $Yy0$.

Ejemplo B) Determinar el grupo y diagrama vectorial para la conexión de la Figura 40.

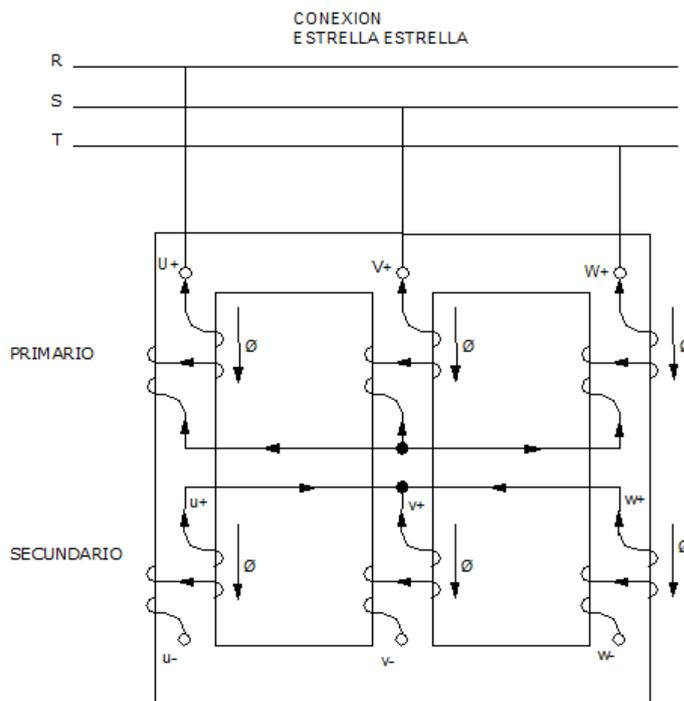
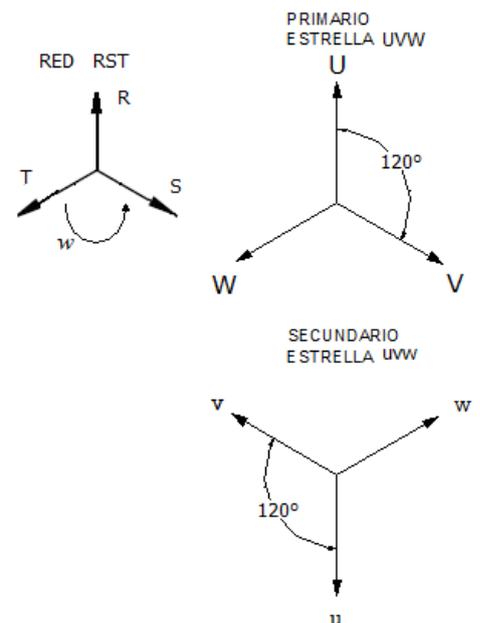


Figura 40

a) Disposición práctica



Yy6

b) diagrama vectorial

Se procede siguiendo los mismos pasos que en el ejemplo anterior.

Las polaridades de los terminales del secundario son contrarias a las del primario, por consiguiente se traza el vector U_{ou} paralelo y de sentido contrario al U_{oU} .

El ángulo entre U_{ou} y U_{oU} es de 180° , luego el grupo es: **Yy6**.

En resumen: Adoptando el convenio derivado de la regla de Maxwell (Figura 39a y 40a), *cuando las polaridades de los terminales de línea son inversos el desfase es de 180°* , (Figura 40b) y *si son iguales, será de 0°* (Figura 39b).

Ejemplo C) El mismo problema para la conexión de la Figura 41.

En la columna U la polaridad va de V a U, en la columna V va de W a V y en la W, de U a W.

En el secundario en la columna u la polaridad se dirige de o a u, entonces se traza paralelo a UV y en **el mismo sentido, porque las polaridades de los terminales de línea son iguales**. El mismo criterio se usa para las demás columnas.

TRANSFORMADORES

POLARIDAD Y DESFASE DE TRANSFORMADORES - 2ª PARTE

El ángulo que forma U_{0U} en el triángulo, con 0_{0u} en la estrella, es de -30° ; luego el grupo es Dy11.

En los ejemplos planteados se observa que en las conexiones estrellas las flechas de polaridades convergen o divergen del centro y en las conexiones triángulo giran en un sentido u otro dependiendo de la polaridad que se adopte para los terminales.

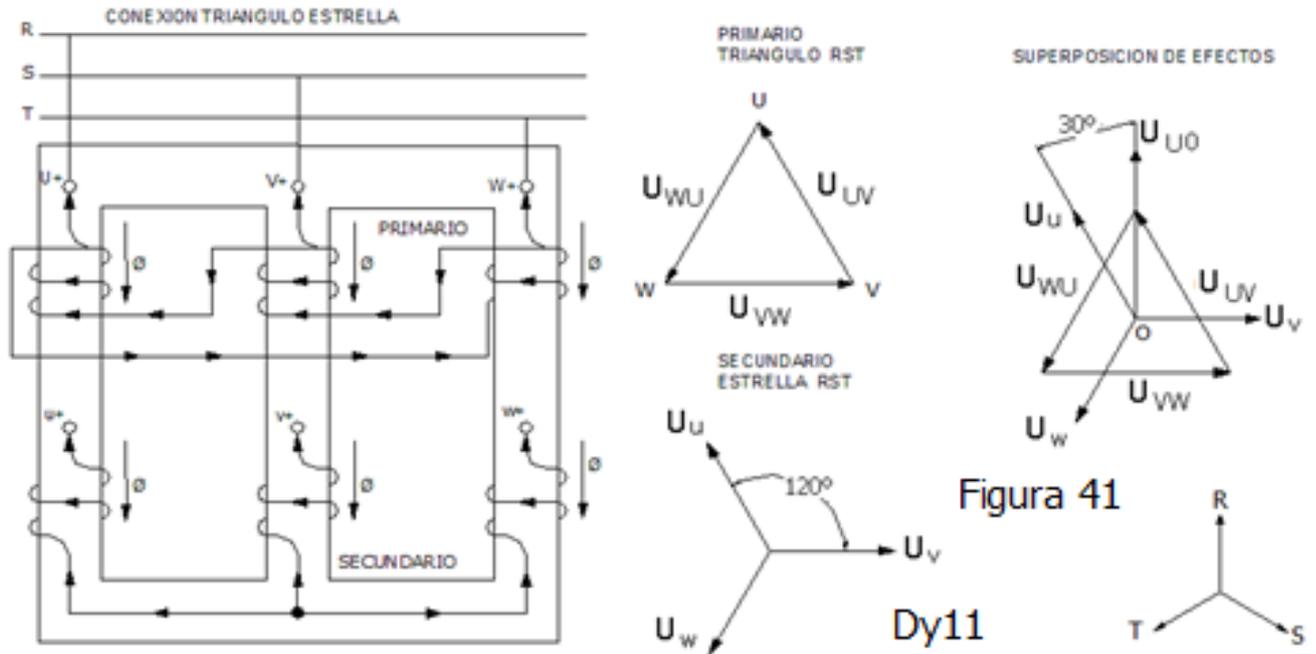


Figura 41

Dy11

5.- Secuencia de fases

También llamado orden de rotación de los vectores.

Es la sucesión en el tiempo u orden de paso frente a un observador fijo, de los máximos de los parámetros eléctricos tensión o intensidad, en las tres fases de un sistema. A ella corresponde un orden en la rotación anti horario del diagrama vectorial (Figura . 42).

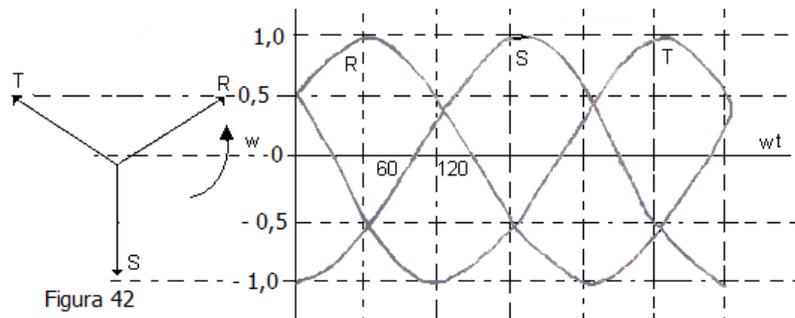


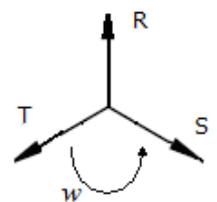
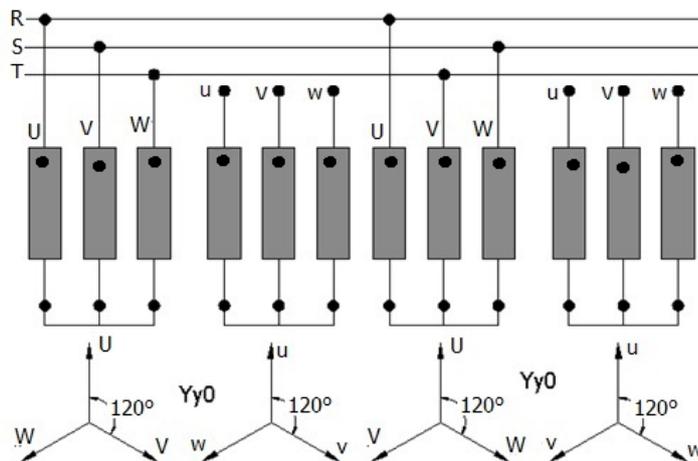
Figura 42

El orden de rotación viene impuesto por la manera de conectar sus terminales a la red, invirtiendo dos de ellos se invierte la secuencia

La **secuencia** puede ser **coincidente** u **opuesta**, entre los sistemas primarios y secundarios.

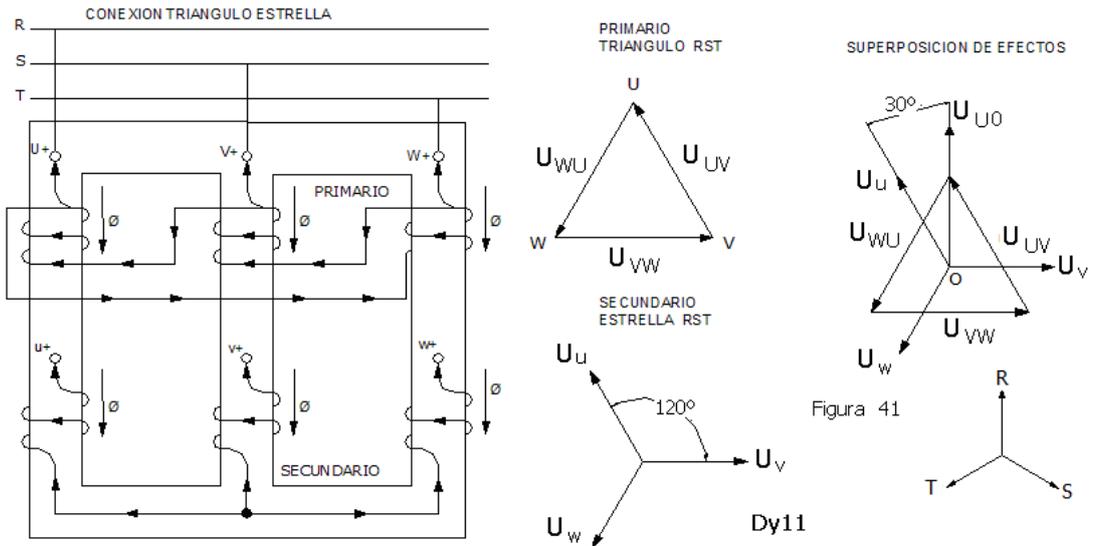
La **inversión del orden de rotación** altera los desfases de las fem. secundarias respecto a las primarias, **cuando la conexión** de ambos sistemas **es distinta**, y no se altera cuando son iguales.

Ejemplos:

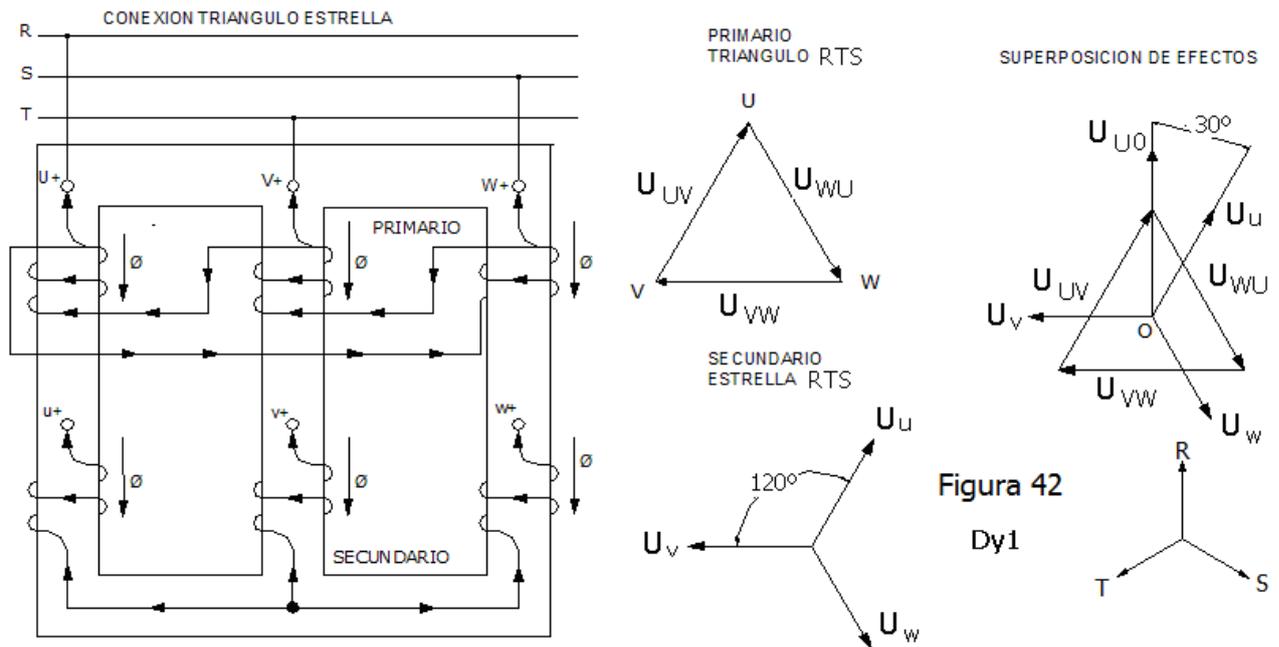


TRANSFORMADORES

POLARIDAD Y DESFASE DE TRANSFORMADORES - 2ª PARTE



Para el 1º caso: En el primario la fase VU está conectada a los bornes SR de la línea; se traza VU//SR; la fase WV está conectada a los bornes TS de la línea, luego: WV//TS y por último, UW conecta a RT, luego UW//RT. Así se obtiene el sentido de giro anti horario.
 En el secundario la fase Nu está en fase con VU, se traza Nu//VU y así sucesivamente.- Se observa que Nu está a -30° de lo que sería NU del triángulo.- Por consiguiente el grupo es Dy11.-

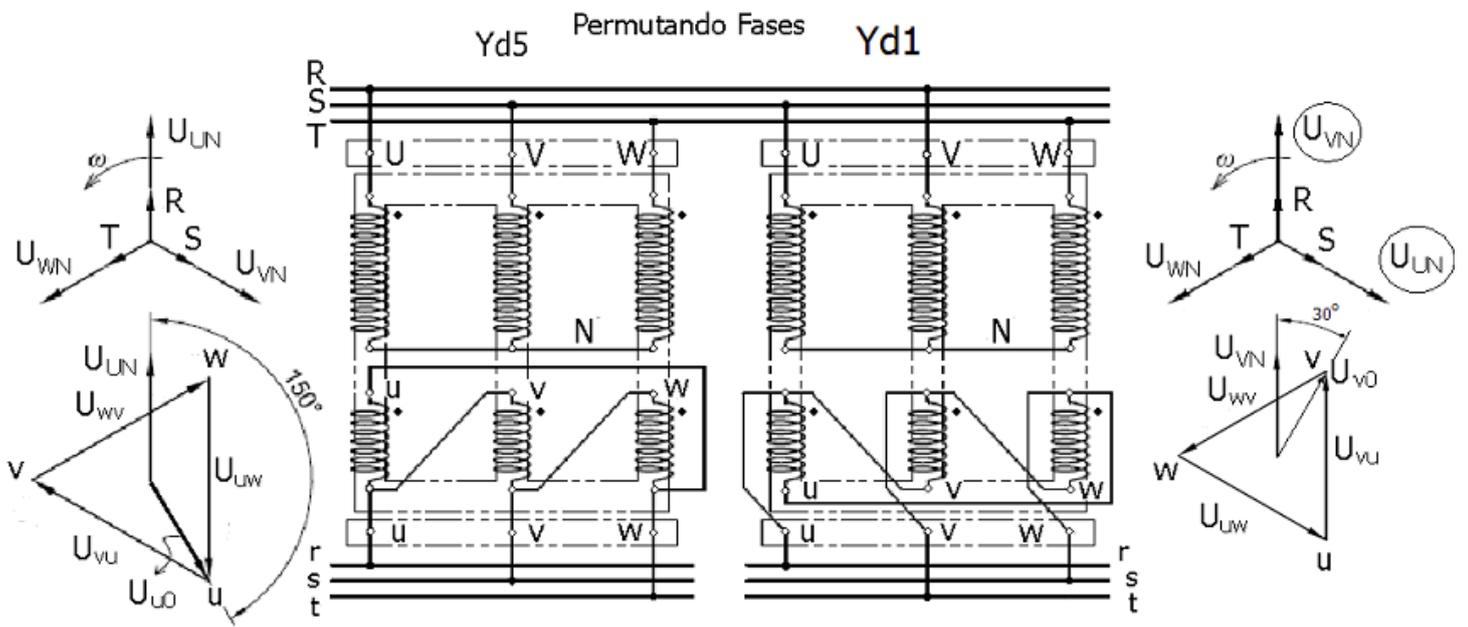
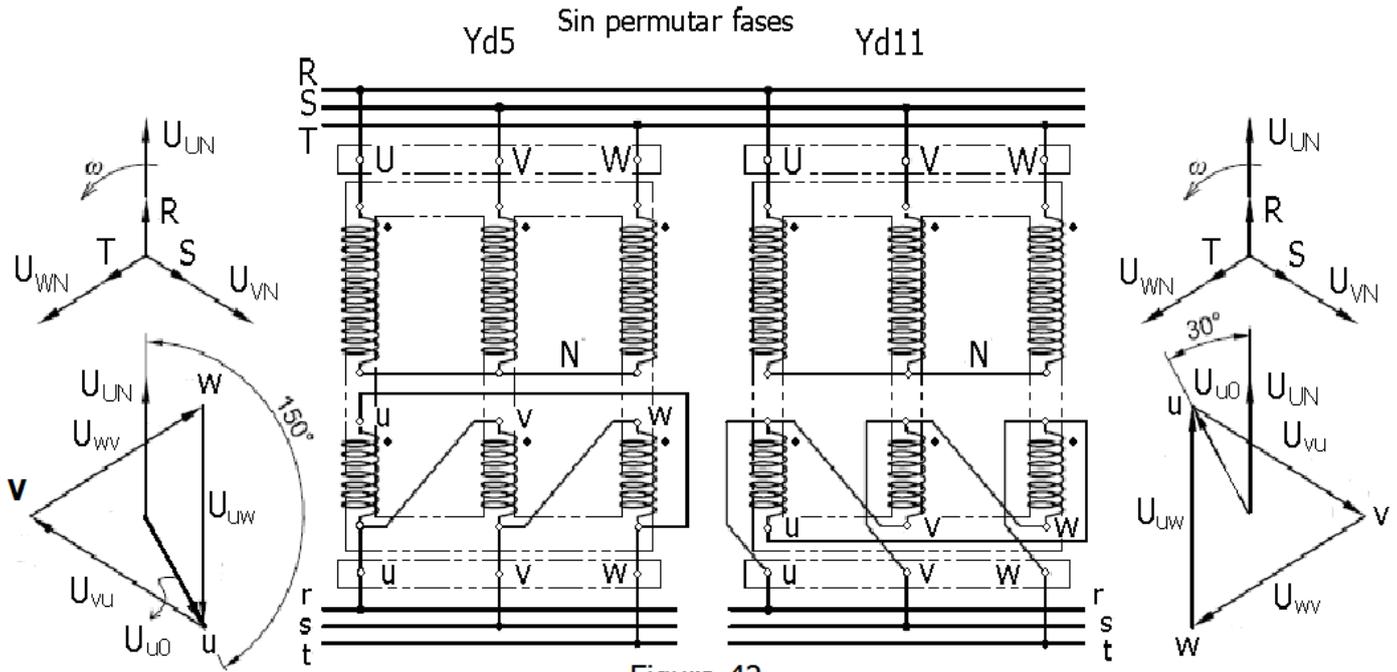


Con el mismo criterio se analiza el segundo caso en el que se cambiaron las conexiones primarias y se deduce que cambia el grupo y la secuencia.

Ejemplo: Como permutando las fases de un Yd11 puede transformarlo en un Yd1, pero cuyo diagrama fasorial coincide con el Yd5 y se puede conectar en paralelo con las posiciones relativas de las conexiones indicadas.

TRANSFORMADORES

POLARIDAD Y DESFASE DE TRANSFORMADORES - 2ª PARTE



TRANSFORMADORES

POLARIDAD Y DESFASE DE TRANSFORMADORES - 2ª PARTE

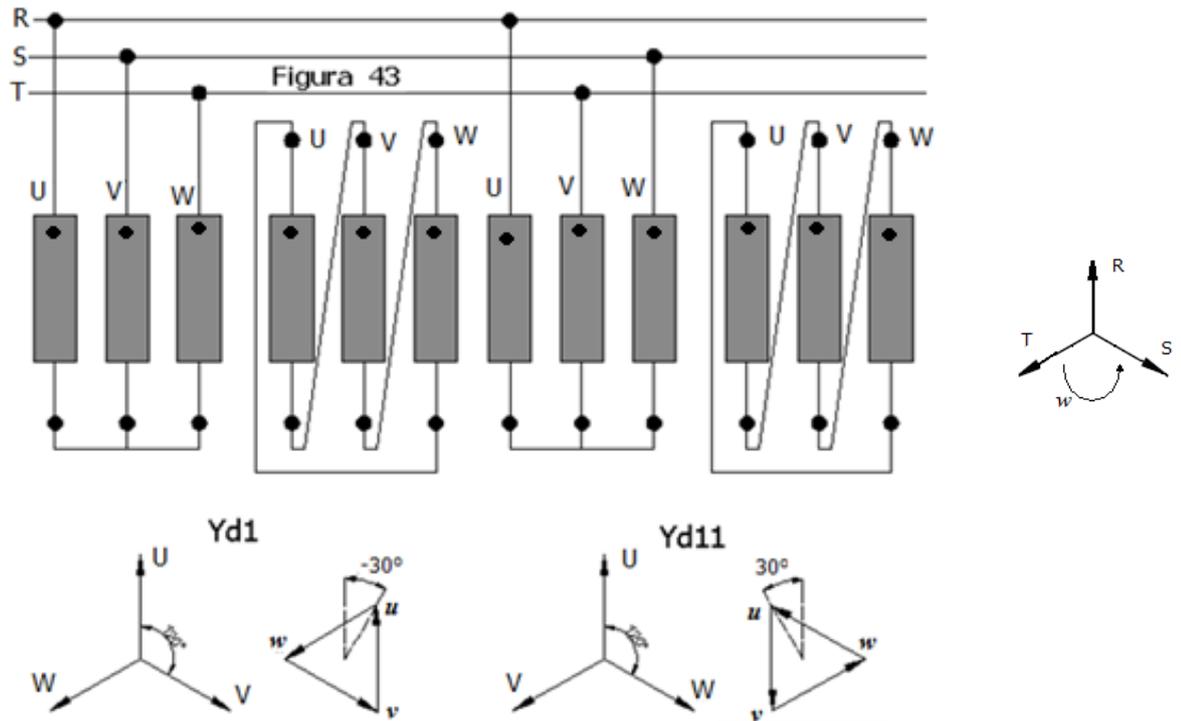


Figura 44

Método de Ensayo

Un transformador queda perfectamente definido cuando se indica, como en el siguiente ejemplo:

- | | |
|------------|-------------|
| -Polaridad | sustractiva |
| -desfase | -30° |
| -secuencia | coincidente |
| -conexión | ΔY |
| -grupo | Dy 11 |

Es de notar que en la designación del grupo queda implícita la conexión y el desfase.

Existe un método denominado "Método del diagrama vectorial" (Norma IRAM N° 2104) que mediante simples lecturas de tensión se puede determinar la polaridad, desfase y secuencia de un transformador.

El procedimiento de ensayo consiste en lo siguiente: Se conecta un borne de un arrollamiento con el correspondiente del otro, (por ejemplo U con u, Figura 45). Se aplica a uno de los arrollamientos una tensión alterna de valor adecuado al voltímetro a usar, se miden las tensiones entre bornes, con el análisis de los valores obtenidos comparados con los datos similares en la norma se deducen las características buscadas.

Ejemplo:

Grupo Yd11 o Dy11; trifásico 30°; sustractivo; coincidente (Figura 46)

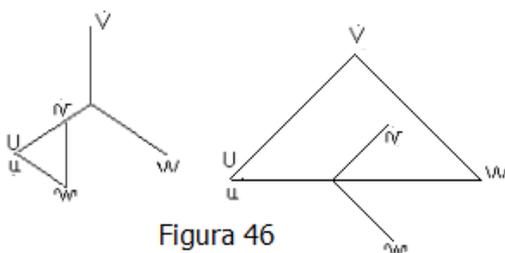


Figura 46

Este caso queda determinado por las condiciones siguientes:

- desplazamiento angular 30°: $Ww = Wv$
- polaridad sustractiva: $Wv < Uw$
- secuencia coincidente: $Vv < Vw$
- además debe verificarse: $Vv = Ww$; $Vw > Wv$

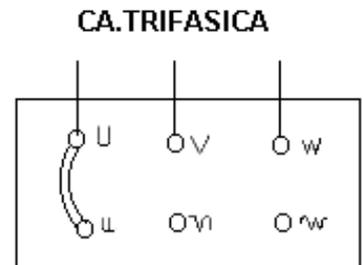


Figura 45

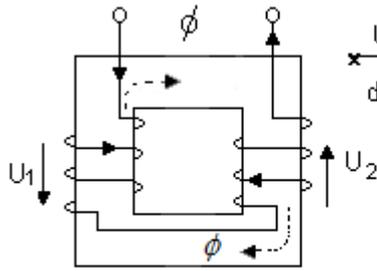
TRANSFORMADORES

POLARIDAD Y DESFASE DE TRANSFORMADORES - 2ª PARTE

Otros Ejemplos prácticos:

A) Dado un núcleo a dos columnas, con un devanado en cada una de ellas:

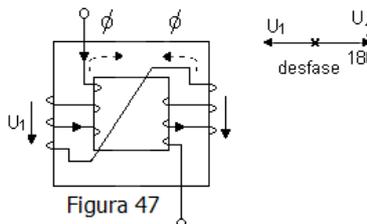
A.1.) Uniendo fin con fin de cada devanado, se obtiene un desfase de 0°



U_1 U_2
desfase 0°

Aplicación: Es el caso de los transformadores monofásicos a dos columnas en que tanto el 1º como el 2º tienen la mitad del devanado en cada columna (Figura 46).

Figura 46



U_1 U_2
desfase 180°

A.2.) Uniendo el fin de un devanado con el principio del otro, se obtiene un desfase de 180° (Figura 47)

Aplicación: Es el caso del transformador diferencial (Figura 48). Cuando se aplica tensión a los bornes y en caso de carga equilibrada, no hay flujo, por consiguiente no aparece tensión en la bobina auxiliar. Cuando se produce un desequilibrio, por ejemplo un contacto a tierra del punto A, predomina el flujo en una bobina, que al concatenar a la bobina auxiliar induce en ella un fem que puede alimentar un interruptor y desconectar la alimentación.

Figura 47

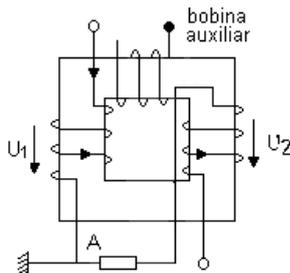


Figura 48

B) Dado un núcleo a tres columnas, con dos devanados, uno en cada extremo:

B.1.) Uniendo fin con fin de cada devanado, se obtiene un desfase de 120° .

Aplicación: Conversión trifásico-monofásico.

El transformador posee un 1º trifásico normal y el 2º monofásico en V abierta (Figura 49).

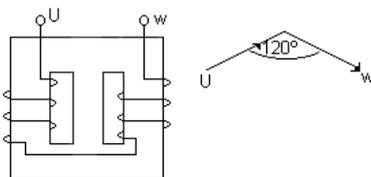


Figura 49

B.2.) Uniendo el fin de un devanado con el principio del otro, se obtiene un desfase de 60° .

Aplicación: Transformadores o auto transformadores para arranque de motores eléctricos.

Son máquinas trifásicas con dos devanados y con tensiones equilibradas, denominadas conexión en V (Figura 50) o triángulo abierto.

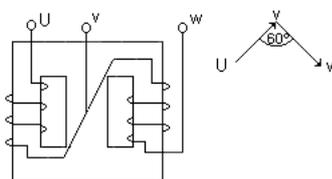


Figura 50

C) Dos transformadores monofásicos, montaje en V, para formar un sistema trifásico de medición, para alimentación de voltímetros, vatímetros, contadores, etc. según la disposición de figura 51. Los devanados deben estar a 60° .

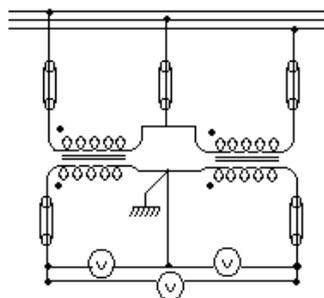


Figura 51

Ejercicio: Determinación de los parámetros del circuito equivalente

Normalmente los datos que se tiene de un transformador son los siguientes:

- Potencia: S [kVA]
- Tensión primaria: U_1 [V]

TRANSFORMADORES

POLARIDAD Y DESFASE DE TRANSFORMADORES - 2ª PARTE

- Tensión secundaria en vacío: U_{20} [V]
- Perdidas en cortocircuito P_{cc} [W] a 75° C
- Tensión de cortocircuito %: $u_{cc}\%$
- Conexión o grupo

Con estos, datos se pueden obtener las impedancias y sus componentes ya sean referidas al primario o secundario y las componentes de la U_{cc} , todas ellas por fase.-

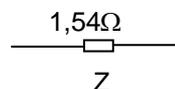
$$\begin{aligned} \text{Tensión de cortocircuito} & \dots\dots\dots U_{cc} = \frac{U_1 \cdot u_{cc} \%}{100} \\ \text{Corriente primaria por fase} & \dots\dots\dots I_1 = \frac{S_x \cdot 1000}{3 U_1} \\ \text{Impedancia equivalente referida al 1º, en modulo.} & \dots\dots\dots Z = \frac{U_{cc}}{I_1} \\ \text{o bien verificar por} & \dots\dots\dots Z = \frac{u_{cc} \% \cdot U_1}{I_1 \cdot 100} \\ \text{Resistencia equivalente referida al 1º, en modulo} & \dots\dots\dots R = \frac{P_{cc}}{3 I_1^2} \\ \text{Reactancia equivalente referida al 1º, en modulo} & \dots\dots\dots X = \sqrt{Z^2 - R^2} \\ \text{Impedancia compleja referida a primario} & \dots\dots\dots Z = R + jX \\ \text{Impedancia referida al 1º, en forma polar} & \dots\dots\dots Z = Z/\varphi \\ \text{Relación de transformación} & \dots\dots\dots n = \frac{U_1}{U_{20}} \\ \text{Impedancia referida al 2º, en forma compleja} & \dots\dots\dots Z_{12} = \frac{Z}{n^2} = R_{12} + j X_{12} \\ \text{Impedancia referida al 2º, en forma polar} & \dots\dots\dots Z_{12} = Z_{12}/\varphi \\ \text{Caída óhmica porcentual} & \dots\dots\dots u_r \% = \frac{R I_1}{U_1} 100 \\ \text{o bien verificarla por} & \dots\dots\dots u_x \% = \frac{P_{cc}}{S} 100 \\ \text{Caída, reactiva porcentual} & \dots\dots\dots u_x \% = \frac{X I_1}{U_1} 100 \\ \text{o bien verificarla por} & \dots\dots\dots u_x \% = \sqrt{u_{cc}^2 \% - u_r^2 \%} \end{aligned}$$

Ejemplo:

Calcular los parámetros del circuito equivalente, además las caídas ohmicas, reactivas y de tensión, del siguiente transformador: $S = 1.000$ kVA; $U_1 = 6000$ V; $U_{20} = 231$ V; conexión YY; $P_{cc} = 14.910$ W a 75°C; $u_{cc}\% = 4,27$.-

$$\begin{aligned} U_{cc} &= \frac{U_1 \cdot u_{cc} \%}{100} = \frac{6000 \cdot 4,27}{100} = 256,20V \quad \text{En línea} \\ I_1 &= \frac{S \cdot 1000}{3 U_1} = \frac{1000000}{3 \cdot 6000/\sqrt{3}} = 96,2 \text{ A} \quad ; \quad Z = \frac{U_{cc}}{I_1} = \frac{256,2/\sqrt{3}}{96,2} = 1,54\Omega \text{ por fase} \end{aligned}$$

Por tanto, el transformador como impedancia en una línea será:

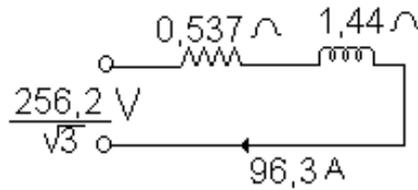


O también: $Z = \frac{u_{cc} \% \cdot U_1}{I_1 \cdot 100} = \frac{4,27 \cdot 6000/\sqrt{3}}{96,2 \cdot 100} = 1,54\Omega$

TRANSFORMADORES POLARIDAD Y DESFASE DE TRANSFORMADORES - 2ª PARTE

$$R = \frac{P_{cc}}{3I_1^2} = \frac{14910}{3(96,2)^2} = 0,537 \Omega \text{ por fase}; X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{1,54^2 - 0,537^2} = 1,44 \Omega \text{ por fase}$$

El circuito equivalente será



$$u_R \% = \frac{R I_1}{U_1} 100 = \frac{0,537 \cdot 96,2 \cdot 100}{6000 / \sqrt{3}} = 1,49 \% \quad ; \text{ o bien : } u_R \% = \frac{P_{cc}}{S} 100 = \frac{14910 \cdot 100}{1000000} = 1,49 \%$$

$$u_x \% = \frac{X I_1}{U_1} 100 = \frac{1,44 \cdot 96,2 \cdot 100}{6000 / \sqrt{3}} = 4 \% \quad ; \text{ o bien : } u_x \% = \sqrt{u_{cc}^2 \% - u_R^2 \%} = \sqrt{4,27^2 - 1,49^2} = 4 \%$$

la caída de tensión será: $\Delta u \% = u_R \% \cos \varphi + u_x \% \operatorname{sen} \varphi = 1,49 \cdot 0,8 + 4 \cdot 0,6 = 3,59 \%$

y la tensión a plena carga será: $U_2 = 231 - \frac{3,59 \cdot 100}{231} = 229,45V$

..—ooOoo—..