

POLARIDAD, DESFASE Y SECUENCIA EN LOS TRANSFORMADORES

Ing. Roberto De Rossetti

Se estudian estos conceptos que afectan las relaciones entre los elementos de una transformación polifásica, determinan propiedades individuales, condicionan la conexión en paralelo (relaciones mutuas), permiten la formación de instalaciones polifásicas con elementos monofásicos y las transformaciones especiales.

Dichos conceptos son:

- 1) Polaridad propia de un devanado.
- 2) Polaridad relativa de dos devanados.
- 3) Desfase de un sistema o desplazamiento angular
- 4) Desfase entre sistemas.
- 5) Secuencia de fases u orden de rotación de los vectores.

1) POLARIDAD PROPIA DE UN DEVANADO

Expresa las relaciones de signo entre el flujo (Φ) y las magnitudes eléctricas (U,I).

Dado un devanado, si se supone alimentado por corriente continua y se adopta por convención un sentido positivo para las corrientes en cualquiera de los dos terminales posibles; el sentido del flujo queda determinado por la regla de Maxwell (FIGURA 1). Queda definido así el devanado por su "polaridad" o signo de sus magnitudes eléctricas.

La nomenclatura a usar puede ser: una flecha en el devanado con el signo (+) o (-) según el sentido; un punto (.) para uno de ellos sin marcar el otro o las letras (K) o (L).

Otra de las relaciones que se debe considerar es la denominada "polaridad axial" de la bobina. Esta indica el sentido en que avanza la corriente en el devanado (FIGURA 2).

En las figuras siguientes se grafican los conceptos expuestos:

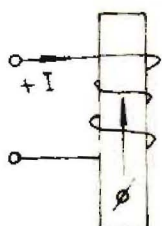


Fig. N° 1

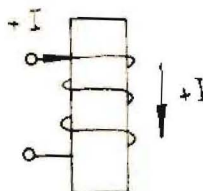


Fig. N° 2

La convención adoptada también se puede aplicar a la inversa, es decir, fijando un sentido para el flujo y determinar el signo para la corriente. De esta manera puede observarse mejor cómo la forma en que esta ejecutado el devanado afecta la polaridad. Por ejemplo, en las FIGURAS 3 y 4, vemos que arrollamientos devanados en sentido contrario, y para igual sentido de flujo, cambian las polaridades de los terminales y la axial.

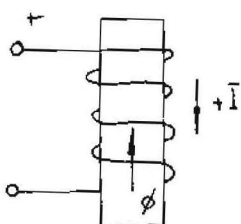


Fig. N° 3

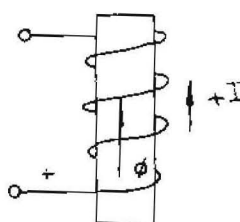


Fig. N° 4

Así queda también definida la polaridad de los terminales por la condición de que la corriente sale del terminal o llega a él:



Tendrán igual polaridad cuando tengan igual condición , por ejemplo:



La polaridad axial determina la de los terminales. Por esto suele no dibujarse el detalle del bobinado y esquematizarlo indicando la polaridad axial. (FIGURA 5).

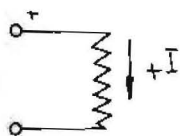


Fig. N° 5

Los conceptos expuestos nos permiten efectuar las conexiones de las bobinas debidamente.

2) POLARIDAD RELATIVA DE DOS DEVANADOS

Se consideran dos devanados de una misma fase concatenados por un flujo común. Las polaridades quedan perfectamente definidas por la relación invariable que existe entre los tres elementos : las dos bobinas y el flujo.

Queda definido de esta manera si dos terminales, uno primario y otro secundario, son o no de la misma polaridad.

• La propiedad fundamental que caracteriza la polaridad relativa es la que, suponiendo un transformador monofásico e imaginando unidos por un puente los terminales de igual polaridad, hace que la corriente de carga circule en cada instante en coincidencia de fase por las líneas primarias y secundarias, es decir, supuesto de relación 1:1, como si el mismo no existiese. (FIGURA 6).

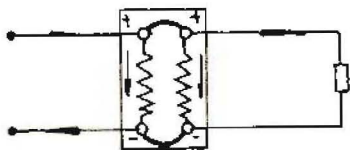
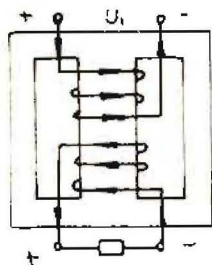


Fig. N° 6

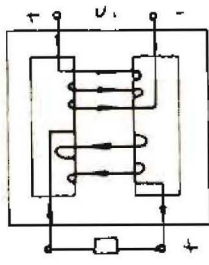
Las flechas en las líneas indican el sentido real, físico de las corrientes (recordar el diagrama vectorial: circulan casi en oposición de fase), en cambio las flechas en los devanados indican la polaridad de los mismos.

Consideremos dos transformadores monofásicos acorazados con los secundarios arrollados en sentido contrario uno del otro (FIGURA 7 y 8). Analicemos el fenómeno físico y determinemos las polaridades de los terminales, aplicando los conceptos de la propiedad fundamental.



Polaridad sustractiva

Fig. N° 7



Polaridad aditiva

Fig. N° 8

Se trazaron las corrientes desfasadas 180°, y aquellos terminales que supuestos unidos, permiten el paso de la corriente en el mismo sentido en ese instante, pertenecen a la misma polaridad.

Consideremos ahora los mismo ejemplos, aplicando los conceptos de polaridad. Se fija un flujo y se determina el sentido de las corrientes según Maxwell (FIGURA 9 y 10). Adoptamos como positivo el terminal del que sale la corriente.

Fig. N° 9

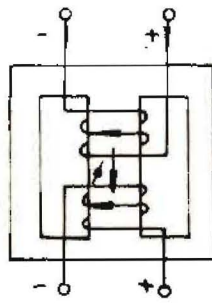
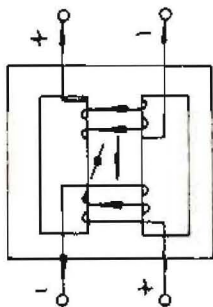


Fig. N° 10

Observamos que el método considerando polaridades (FIGURA 9 y 10) determina la misma polaridad de bornes que en el hecho físico (FIGURA 7 y 8).

Nótese que en los conceptos de polaridad (FIGURA 9 y 10) no se indica la tensión aplicada al primario ni carga.

Cuando los arrollamientos están devanados en el mismo sentido la polaridad se denomina sustractiva (FIGURA 7 y 9) y cuando lo están en sentido contrario, aditiva (FIGURA 8 y 10).

En otras palabras, se puede decir que:

Un terminal primario y otro secundario son de igual polaridad cuando, en cada instante, la corriente de carga entra por el terminal primario y sale por el secundario siguiendo la misma dirección, tal como si ambos terminales formasen un circuito continuo; o bien, // cuando las espiras conectadas a los mismos, en su paso de uno a otro terminal, conservan el mismo sentido de giro o dirección, alrededor del núcleo.

Dos bornes de igual polaridad se dicen que son "Homólogos".

Método de Ensayo

Existen tres métodos para determinar si la polaridad es aditiva o sustractiva (Norma IRAM N° 2104); analizaremos sólo uno, el denominado Método de Tensión Aplicada. La conexión para el ensayo es la siguiente (FIGURA 11).

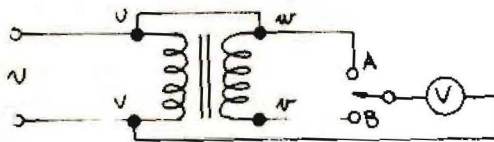


Fig. N° 11

Cuando se verifique que $U_A > U_B$, la polaridad será sustractiva y los terminales unidos serán de la misma polaridad.

Cuando $U_A < U_B$, será aditiva y los terminales unidos distintos.

Aplicando los conceptos de polaridad y dibujando el mismo circuito pero de otra manera, se deduce la explicación del método. (FIGURAS 12 y 13).

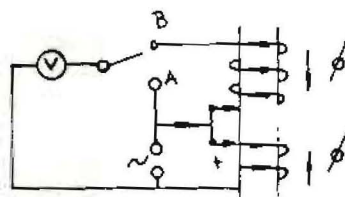


Fig. N° 12

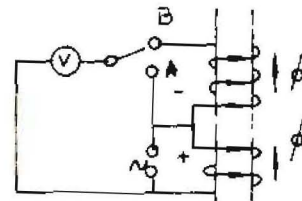


Fig. N° 13

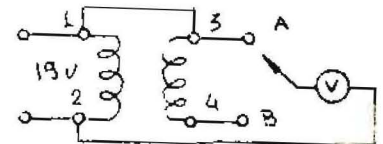
En la FIGURA 12 los arrollamientos están devanados en igual sentido, polaridad sustractiva (flujos Opuestos) la tensión en B es menor que en A. A la inversa ocurre en la FIGURA 13.

Aplicación

Este concepto nos permite determinar, mediante un ensayo, si dos arrollamientos están devanados en un mismo sentido o no.

EJEMPLO:

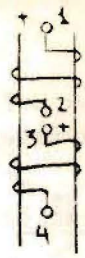
En un transformador desconocido, se puentean los bornes 1 y 3, y se aplica al primario una tensión de 19 V.



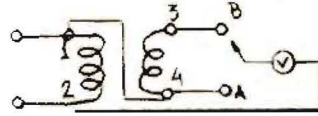
Se obtienen las siguientes mediciones

$$\begin{aligned} \text{PRIM: } U_A &= U_{2-3} = 19 \text{ V} \\ \text{SEC.: } U_{3-4} &= 6\text{V} - \text{SUST.} \\ U_B &= U_{2-4} = 13 \text{ V} \end{aligned}$$

Como $U_A > U_B$ ($19 > 13$) la polaridad será sustractiva, los devanados están en igual sentido (mirándolos desde los bornes 1 y 3), y los bornes puenteados son de igual polaridad



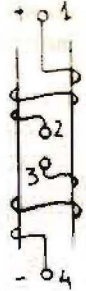
Si se puentean los bornes 1 y 4:



$$\text{PRIM: } U_A = U_{2-4} = 19 \text{ V}$$

Se obtienen las siguientes mediciones: SEC.: $U_{3-4} = 6 \text{ V} + \text{ADIT.}$

$$U_B = U_{2-3} = 25 \text{ V}$$



Como $U_A < U_B$ ($19 < 25$) la polaridad será aditiva, los devanados, (mirándolos desde los bornes 1 y 4) están en sentido contrario y los bornes puenteados son de distinta polaridad.

El nombre también derivaría del hecho de que, conectados los devanados en serie según el ensayo, las tensiones de los devanados se restan (polaridad sustractiva) o se suman (Polaridad aditiva).

3) DESFASE DE UN SISTEMA.

El desfase o desplazamiento angular de las magnitudes eléctricas en los devanados, pueden presentar los siguientes valores: 0° , 180° , 120° y 60° . Veamos cada uno de ellos.

Desfase de 0° y 180°

Considerados dos devanados y elegido el sentido (+) en uno de ellos (FIGURA 14), por ejemplo el borne 1, en el otro se podrá tomar como sentido positivo (+) uno u otro de los dos posibles, el borne 3 ó 4.

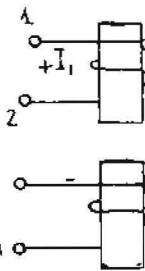


Fig. N^o 14

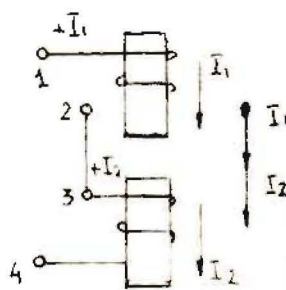


Fig. N^o 15

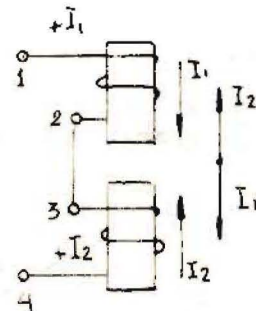


Fig. N^o 16

Considerando (+) el borne 3 (FIGURA 15) las polaridades axiales serán / coincidentes, luego las corrientes están en fase; en cambio tomando como positivo el borne 4 (FIGURA 16) las polaridades axiales son opuestas y las corrientes estarán desfasadas 180° . También puede decirse que si los prin-

cipios o fines de cada bobina tienen igual polaridad están en fase y si no lo tuviesen están a 180° .

Aplicación:

De estos conceptos se deduce que una bobina alimentada por su punto medio, nos determina dos fases en oposición (FIGURA 17). Es lo que ocurre en el caso práctico de un transformador monofásico cuyo secundario tiene punto medio (FIGURA 18) usado en rectificación.

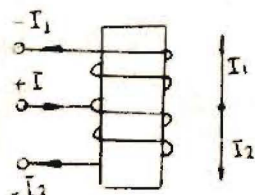


Fig. N° 17

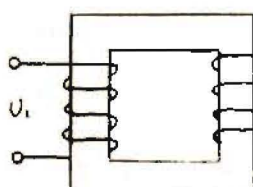


Fig. N° 18

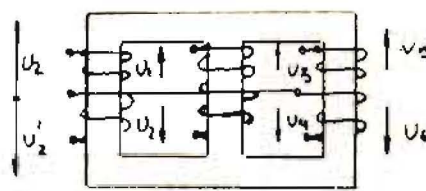


Fig. N° 19

Haciendo extensivo este principio a las tres columnas de un transformador trifásico, se obtiene un sistema exafásico.

Uniendo los puntos medios de las columnas (FIGURA 19) cada una tiene / dos tensiones en oposición con sus puntos medios en común. Cada una de ellas está desfasada 120° respecto de la otra, por el desfase de la tensión trifásica a la que se conecta el primario del transformador (en la FIGURA 19 está representado el secundario solamente). Por consiguiente la dirección de $U1-U2$ está a 120° respecto a la dirección de $U3-U4$ y está a 120° de $U5-U6$. El diagrama vectorial resultante es el de la FIGURA 20, en el que se ven las seis fases con seis tensiones iguales.

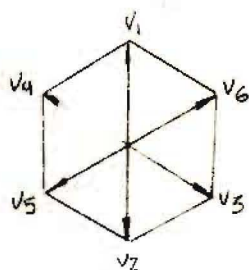
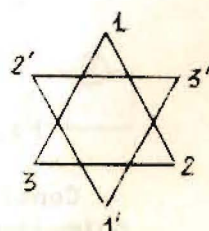
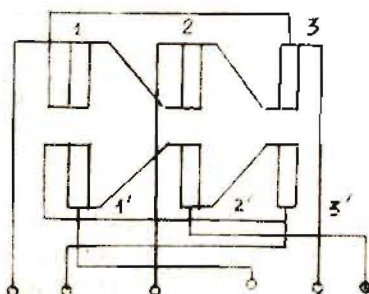
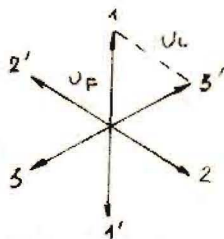
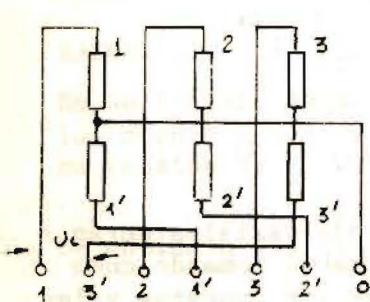


Fig. N° 20

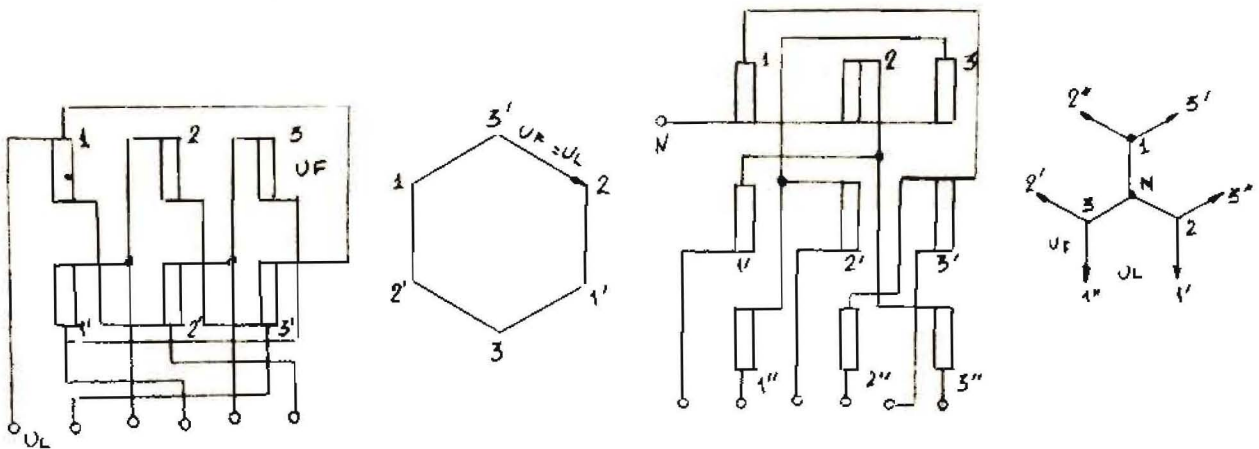
Conexiones Exafásicas

Se indican a continuación, las conexiones exafásicas posibles y sus / respectivos diagramas vectoriales.



En anillo

Tirple Estrella u orquilla



Transformación dodecafásica: es posible obtener un sistema con 12 fases ello se consigue con dos transformadores exafásicos en paralelo, uno Δ y el otro \ast

Aplicación: los transformadores trifásicos-exafásicos se usan para rectificación en tracción eléctrica.

Desfase de 120°

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

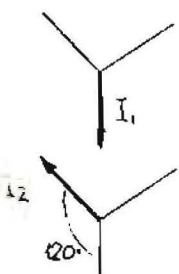


Fig. 21

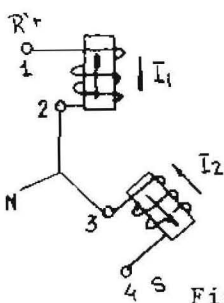


Fig. 22

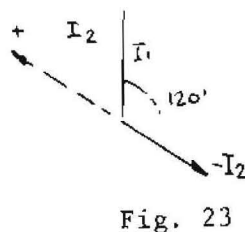


Fig. 23

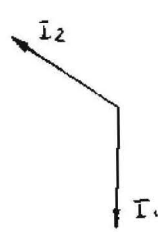


Fig. 24

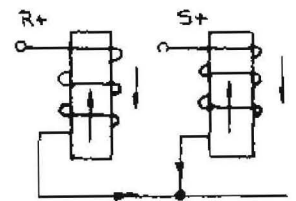


Fig. 25

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.

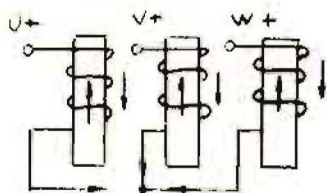


Fig. N° 26

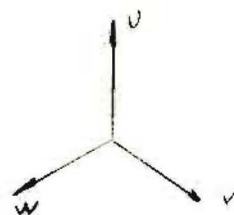


Fig. N° 27

Desfase de 60°

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

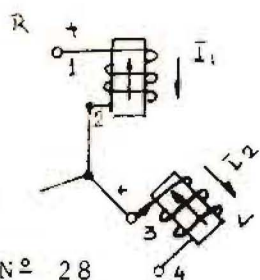


Fig. N° 28

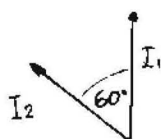


Fig. N° 29

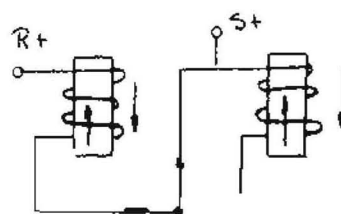


Fig. N° 30

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

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).

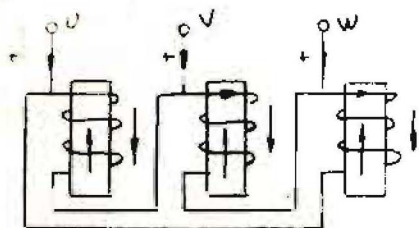


Fig. N° 31

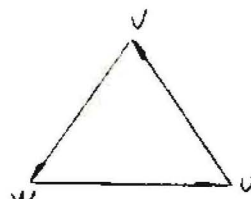


Fig. N° 32

Otra Aplicación:

Aplicaremos los dos conceptos anteriores a la denominada "conexión zigzag". Esta consiste en dividir cada columna de un transformador trifásico en dos partes iguales y conectar cada mitad, en serie con una mitad de la columna siguiente y así sucesivamente (FIGURA 33). Esto da la posibilidad de conectar la bobina de una columna (U_1) a uno u otro borne de la bobina de la columna siguiente (V_n). Si la elección fuese errónea, el devanado se quema.

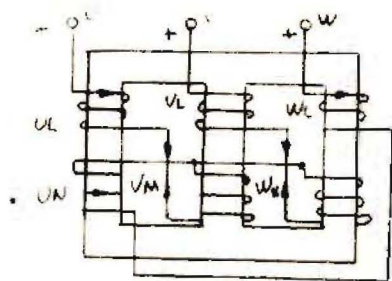


Fig. N° 33

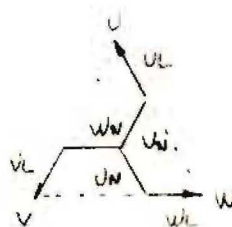


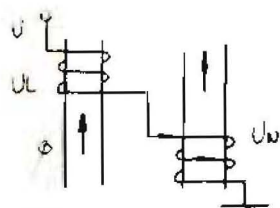
Fig. N° 34

Apliquemos los conceptos de polaridad: 1^o) fijamos un sentido para el flujo en las tres columnas, 2^o) determinamos las corrientes, 3^o) si conectamos el fin de U_l con el fin de V_n , quedan unidas en serie sustractiva (fin con fin), luego las bobinas están a 120° (VER FIGURA 25), 4^o) repitiendo la conexión para las demás bobinas y uniendo los principios de U_n , V_n y W_n , 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_n , V_n y W_n , 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.
- 2^o) U_n está en serie sustractiva con W_l por tanto desfasadas 120° . Al extremo de W_l se encuentra el borne W .
- 3^o) De la misma forma se procede para las otras dos columnas.
- 4^o) U_n y U_l son paralelos por pertenecer a la misma columna.
- 5^o) Los sentidos de los vectores U_n y U_l 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.



Aplicación: Fig. 35

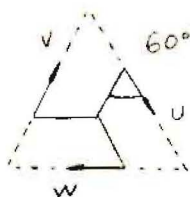


Fig. 36

Las tensiones entre bornes serían menores, aunque las bobinas que componen el sistema sean iguales, entonces al aplicarles la tensión que correspondería, que es mayor, quemaría los devanados.

1^o) 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_v secundarios afectan a dos columnas simultáneamente.

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

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 sí 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

Conexión estrella

Conexión triángulo

Conexión zig-zag

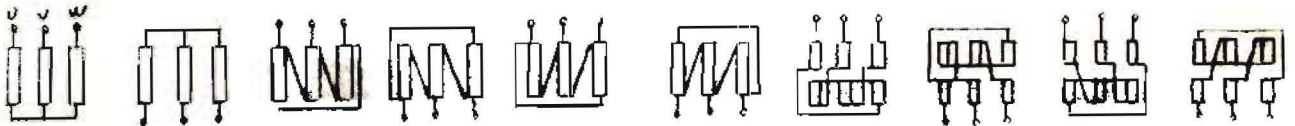


DIAGRAMA VECTORIAL

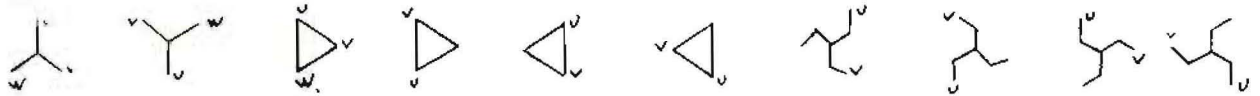


Fig. N^o 37

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

Para designar la conexión se usa una letra mayúscula para el primario y minúscula para el secundario, 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).

INDICE	POSICION AGUJAS	ANGULO
0	⊙	0°
6	⊖	180°
5	⊙	150°
11	⊙	-30°

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: D y 11.

FIGURA 38

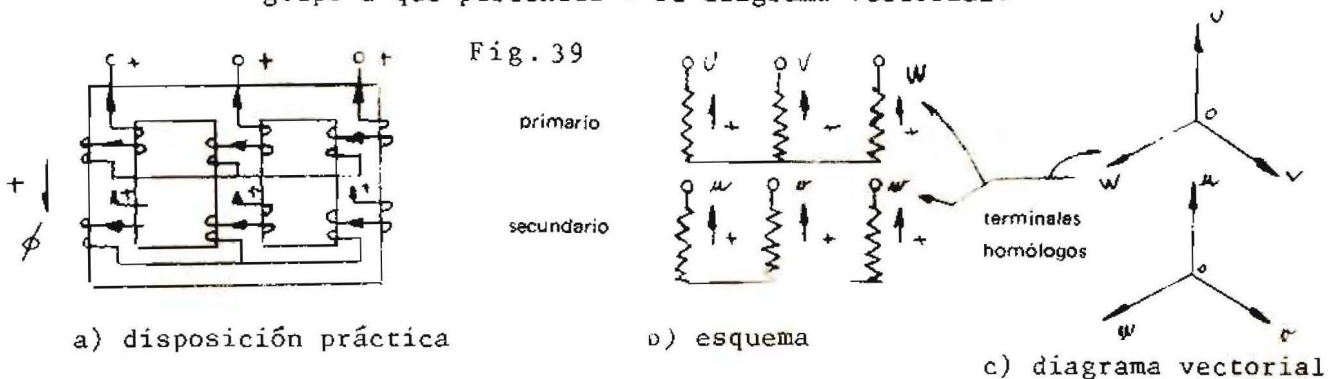
Es de interés destacar que:

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 para a ser Yd1.

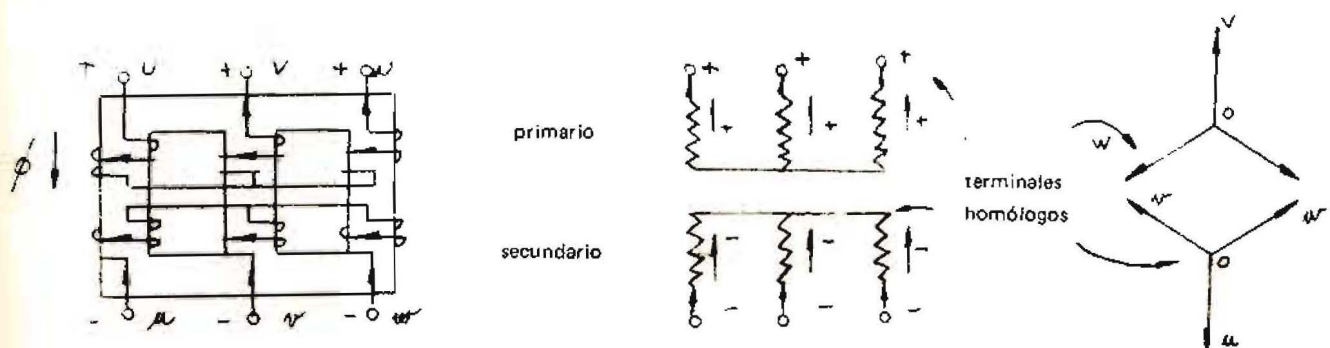
EJEMPLOS:

Ejemplo A) Dada una conexión estrella-estrella (FIGURA 39), determinar el grupo a que pertenece y su diagrama vectorial:



- 1º) Elegimos arbitrariamente la polaridad del sistema de terminales primarios, conviniendo el siguiente sentido como positivo: $\overset{+}{\text{O}} \rightarrow \overset{+}{\text{U}}$
- 2º) Queda determinado el sentido (+) 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 O-u paralelo a O-U y en el mismo sentido. Se procede igual para las otras columnas.
- 6º) El ángulo entre O-u y O-U es 0° , luego el grupo es Y y 0.

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



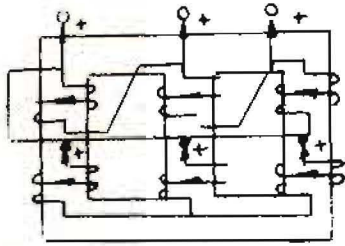
Se procede siguiendo los mismos pasos que en el ejemplo anterior.-

Las polaridades del secundario son contrarias a las del primario, por consiguiente se traza el vector $O-u$ paralelo y de sentido contrario al $O-U$.

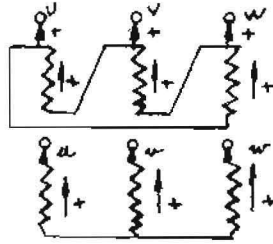
El ángulo entre $O-u$ y $O-U$ es de 180° , luego el grupo es: $Yy6$.

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). Todo esto concuerda con las conclusiones de FIGURA 16.-

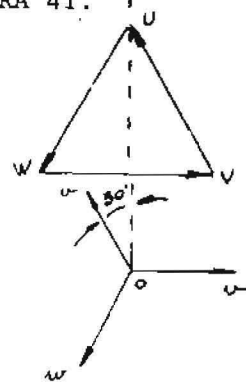
Ejemplo C) El mismo problema para la conexión de la FIGURA 41.



a) disposición práctica



b) esquema



c) diagrama vectorial

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.

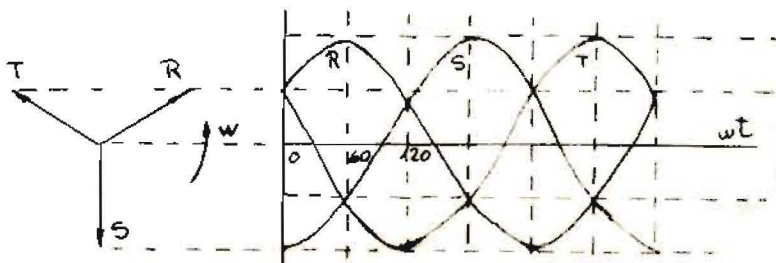
El ángulo que forma $O-U$ en el triángulo, con $o-u$ en la estrella, es de -30° , luego el grupo es $Dy11$.

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.

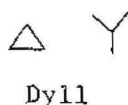
5) SECUENCIA DE FASES

También llamada orden de rotación de los vectores.

Es la sucesión en el tiempo, de los máximos de los parámetros eléctricos tensión o intensidad, en las tres fases de un sistema. A ella corresponde un sentido de rotación del diagrama vectorial (FIGURA 42).



- conexión
- grupo



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 puede determinarse 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 44).- Se aplica a uno de los arrollamientos.

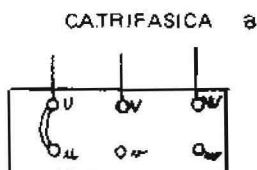


Fig. N° 44

Una tensión alterna de valor adecuado al voltímetro a usar. Se miden / las tensiones entre bornes. Con el análisis de los valores obtenidos se deducen las características buscadas.

EJEMPLO:

Grupo Yd11 o Dy11; trifásico; 30°; sustractivo; coincidente (FIGURA 45)

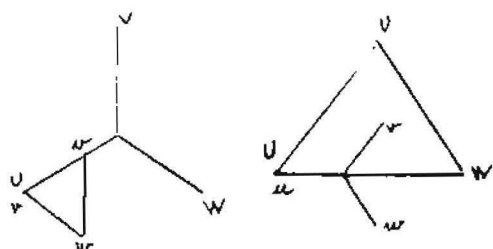


Fig. N° 45

Este caso queda determinado por las condiciones siguientes:

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

OTROS EJEMPLOS PRACTICOS:

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°

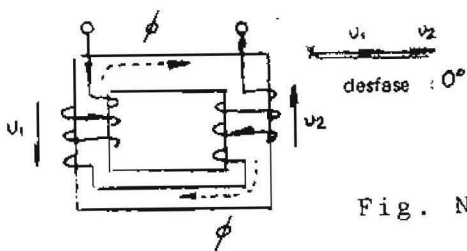


Fig. N° 46

Aplicación: Es el caso de los Transformadores monofásicos a columnas en que tanto el 1° como el 2° tienen la mitad del devanado en cada columna (FIGURA 46).

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

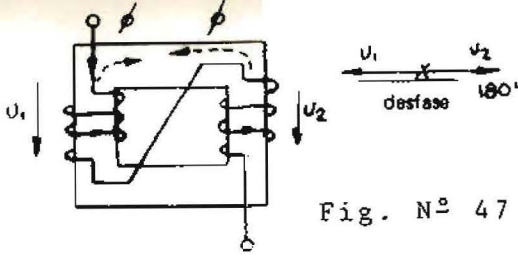
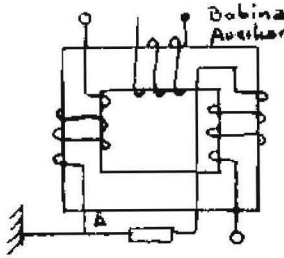


Fig. N° 47

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 una f.e.m., que puede alimentar un interruptor y desconectar la alimentación.

Fig. N° 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° .

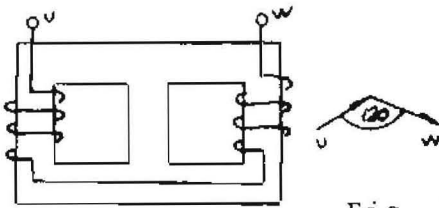


Fig. N° 49

Aplicación: Conversión trifásico-monofásico.-

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

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

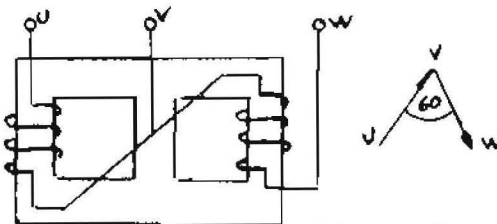


Fig. N° 50

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.

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

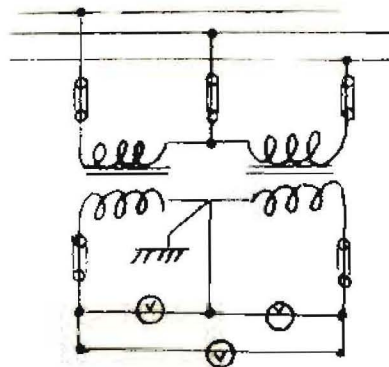


Fig. N° 51

B I B L I O G R A F I A:

- 1º) La Escuela del Técnico Electricista - Tomo VII - Ed. Labor - 1960
- 2º) Transformadores. Convertidores - Enciclopedia CEAC de Electricidad - 1974.
- 3º) Norma IRAM N° 2104 - 1950.

Imprenta Dr. Heriberto Windhausen
de la Facultad de Ingeniería
de la U.N.C.
Mendoza - República Argentina