

Máquinas y Comandos Eléctricos

Joaquín Gómez — 5to “A”

2025

Capítulo 1

Autotransformadores

Los autotransformadores poseen una parte del devanado en común, que corresponde tanto al primario como al secundario. El principio de funcionamiento es el mismo que el del transformador común, entonces la relación de transformación entre las tensiones, las intensidades de corriente y el número de vueltas se mantienen.

Las corrientes primarias y secundarias están en oposición y la corriente total que circula por las espiras en común es igual a la diferencia de la corriente del devanado de baja tensión y el devanado de alta tensión

$$I_c = I_{AT} - I_{BT} \quad \text{si } V_{AT} > V_{BT} \quad (1.1)$$

Para que un autotransformador funcione adecuadamente, los devanados deben tener el mismo sentido de bobinado.

1.1. Autotransformadores Reductores

Si se aplica una tensión alterna entre los puntos A y B, y se mide la tensión de salida entre los puntos C y D, se dice que el autotransformador es un reductor de tensión

En este caso, la relación de vueltas del autotransformador es:

$$\frac{N_s}{N_p} < 1 \quad (1.2)$$

1.2. Autotransformadores elevadores

Si se aplica una tensión de alimentación alterna entre los puntos A y B, y se mide la tensión de salida entre los puntos C y D, se dice que el autotransformador es elevador de tensión.

En este caso, la relación de vueltas del autotransformador es:

$$\frac{N_s}{N_p} > 1 \quad (1.3)$$

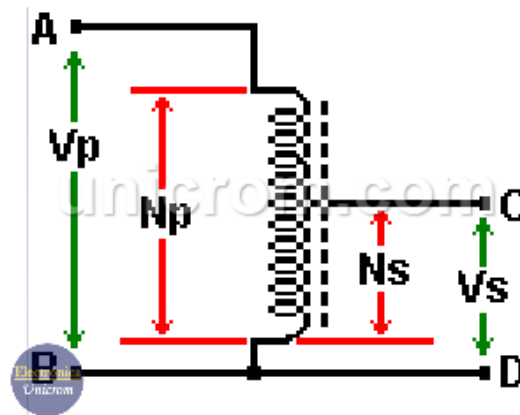


Figura 1.1: Autotransformador reductor

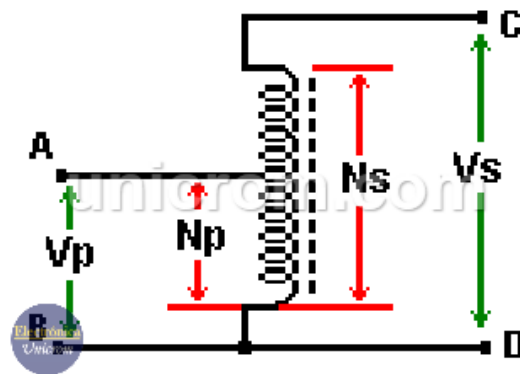


Figura 1.2: Autotransformador elevador

Los autotransformadores tienen la ventaja sobre los transformadores comunes de un peso y costo menor. En lugar de tener un bobinado de AT de N_1 espiras, se debe prever para el bobinado de BT, con un número N_2 de espiras, un número adicional de espiras de $N_1 - N_2$. También hay que tener en cuenta que el conductor de la sección común del bobinado debe tener una sección de alambre en función de la diferencia de corrientes entre AT y BT, o sea, $I_2 - I_1$.

Otra ventaja es la de no necesitar aislamiento entre los bobinados primario y secundario. Sin embargo, esto trae como desventaja que el bobinado primario no es independiente del secundario. Esto causa peligro para una persona, pues, entre tierra y el hilo común del secundario y el primario existe la tensión del primario (Ver figura 1).

Ejemplo 1.2.1. Se requiere un autotransformador para aumentar un voltaje de 220V a

250V. El número total de espiras que tiene el devanado principal es de 2000. Determine la posición del punto de toma primario, la corriente primaria y secundaria cuando la salida tiene una potencia de 10kVA. Y la economía de cobre ahorrada¹.

Tenemos que la relación ideal de vueltas debe ser

$$\frac{V_1}{V_2} < 1 \quad (1.4)$$

ya que el transformador es elevador. De forma que

$$\frac{N_1}{N_2} < 1 \quad (1.5)$$

Así, tenemos que idealmente

$$\begin{aligned} \frac{V_1}{V_2} &= \frac{N_1}{N_2} \\ \frac{220V}{250V} &= \frac{N_1}{2000esp} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Por lo tanto

$$\begin{aligned} N_2 &= \frac{220V \cdot 2000esp}{250V} \\ &= 1760esp \end{aligned} \quad (1.7)$$

El porcentaje de ahorro de cobre está dado por

$$n \cdot 100 \% = \frac{V_1}{V_2} \cdot 100 \% = 88 \% \quad (1.8)$$

Como condición, tenemos que $P_1 = P_2$, así, podemos deducir que

$$\begin{aligned} V_1 I_1 &= P_1 \\ 220V I_1 &= 10000VA \\ I_1 &\approx 45,456A \end{aligned} \quad (1.9)$$

$$\begin{aligned} V_2 I_2 &= P_2 \\ 250V I_2 &= 10000VA \\ I_2 &= 40A \end{aligned} \quad (1.10)$$

Ejemplo 1.2.2. En el siguiente autotransformador reductor indicar el sentido de la corriente (I_c , intensidad común) que circulará por la parte del arrollamiento que tienen en común N_1 y N_2 . Fundamentar el sentido de circulación.

¹La relación n se define como la relación entre el voltaje más bajo y el voltaje más alto, entonces se puede demostrar que el ahorro de cobre es: $n \cdot 100 \%$

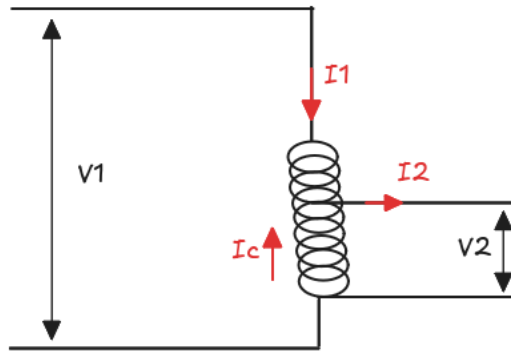
Si tenemos un transformador reductor, donde $V_1 > V_2$, entonces $I_1 < I_2$. Por la ley de Kirchoff tenemos

$$\sum_k I_s^{(k)} = \sum_k I_e^{(k)} \quad (1.11)$$

es decir, la suma de las corrientes de entrada es igual a las de salida. En este caso, si $I_1 < I_2$ tendremos

$$I_2 = I_1 + I_c \quad (1.12)$$

Como la corriente I_1 es la entrada, tenemos que I_2 y I_c serán corrientes de salida.



Capítulo 2

Transformadores Trifásicos

2.1. Introducción

La mayoría de los transformadores utilizados en la transmisión y distribución de energía eléctrica son trifásicos por una cuestión de costos, tamaños y transporte; pero hay excepciones: cuando las potencias son muy grandes, de cientos de m VA (mega volt-amper), o se requieren varios transformadores de gran potencia, e iguales. Por ejemplo, en una central con una cierta cantidad de máquinas de gran potencia, puede convenir utilizar bancos trifásicos armados con tres transformadores del tipo monofásicos, e inclusive, tener algún transformador de reserva.

Se puede decir que un transformador trifásico está constituido por tres transformadores tipo monofásicos montados en un núcleo magnético en común. La constitución más común es la de *tres columnas*, con los arrollamientos primarios y secundarios alternados o concéntricos.

El estudio del transformador trifásico se puede reducir al monofásico a condición de trabajar con los valores por fase. En este sentido, habrá que tener en cuenta la fórmula de potencia a aplicar, en vacío, en carga o en cortocircuito. Deberá ser trifásica y no monofásica.

Los devanados tanto en el primario como en el secundario, pueden estar acoplados en:

⋈ Estrella: Y (en el bobinado de AT), y (en el bobinado de BT)

△ Triángulo: D (en el bobinado de AT), d (en el bobinado de BT)

?? Zig zag: Z (en el bobinado de AT), z (en el bobinado de BT)

Por convención se adopta la letra mayúscula para indicar la forma de conexión del devanado primario y minúscula la del bobinado secundario.

Tenemos nueve posibles formas de conexión, dadas por

$$\begin{array}{ccc} Y_y & D_y & Z_y \\ Y_d & D_d & Z_d \\ Y_z & D_z & Z_z \end{array}$$

(Son nueve porque tenemos 3 opciones, el total es el conjunto $(Y, D, Z) \times (y, d, z)$) Por ejemplo, Y_d denota una conexión primaria en estrella y secundario en triángulo. Las deno-

minaciones son

Y_y = Estrella-Estrella

Y_d = Estrella-Triángulo

Y_z = Estrella-Zigzag

D_y = Triángulo-Estrella

D_d = Triángulo-Triángulo

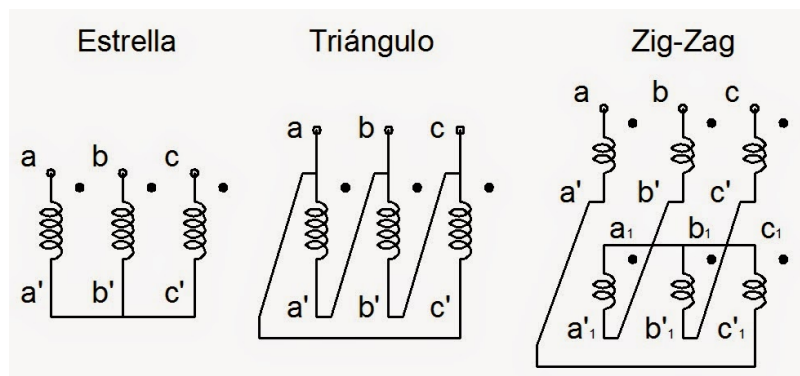
D_z = Triángulo-Zigzag

Z_y = Zigzag-Estrella

Z_d = Zigzag-Triángulo

Z_z = Zigzag-Zigzag

Siendo las primeras seis las más utilizadas. Si algún devanado tiene neutro accesible, al símbolo correspondiente se le señala la letra 'o' o 'n'.

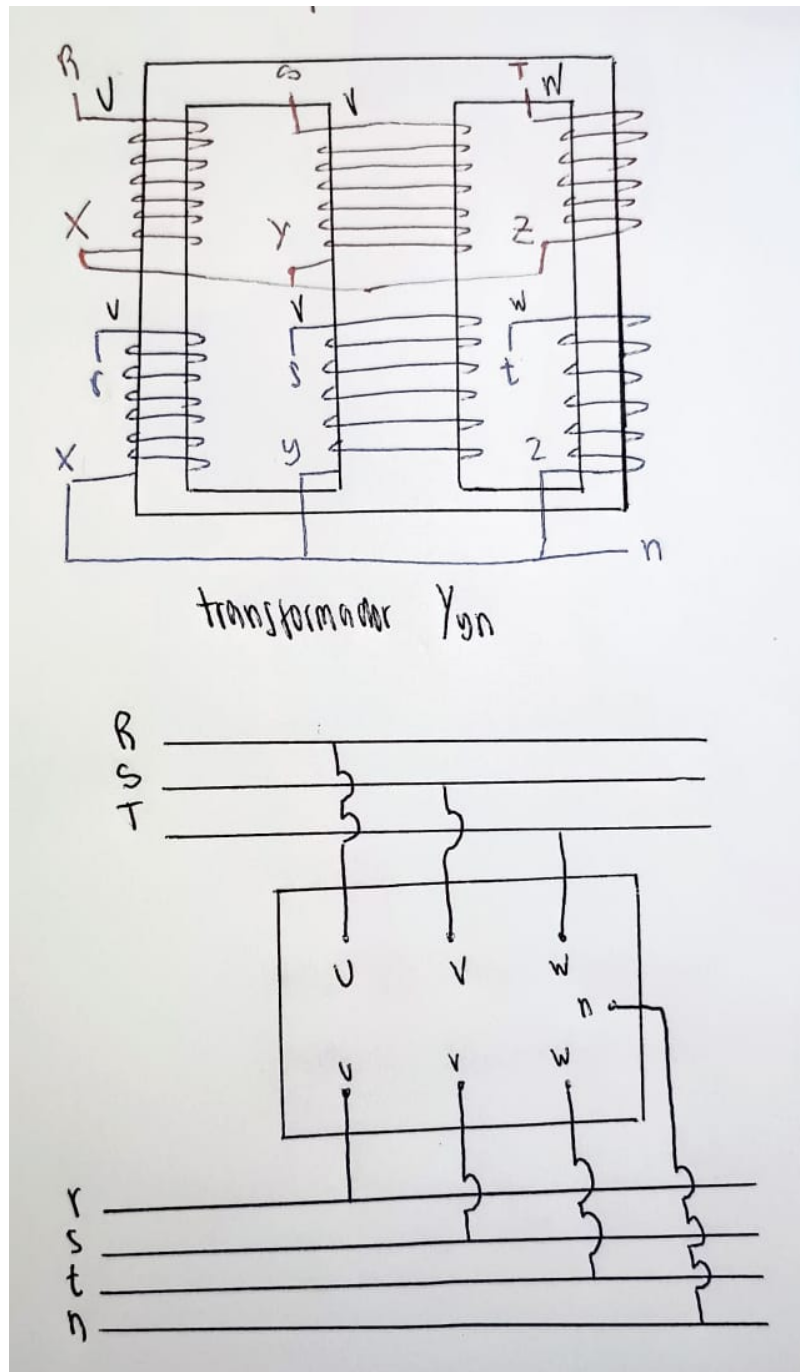


La transformación de tensiones en los sistemas trifásicos pueden realizarse de dos maneras distintas.

De acuerdo a la estructura del núcleo, las más empleadas son las siguientes

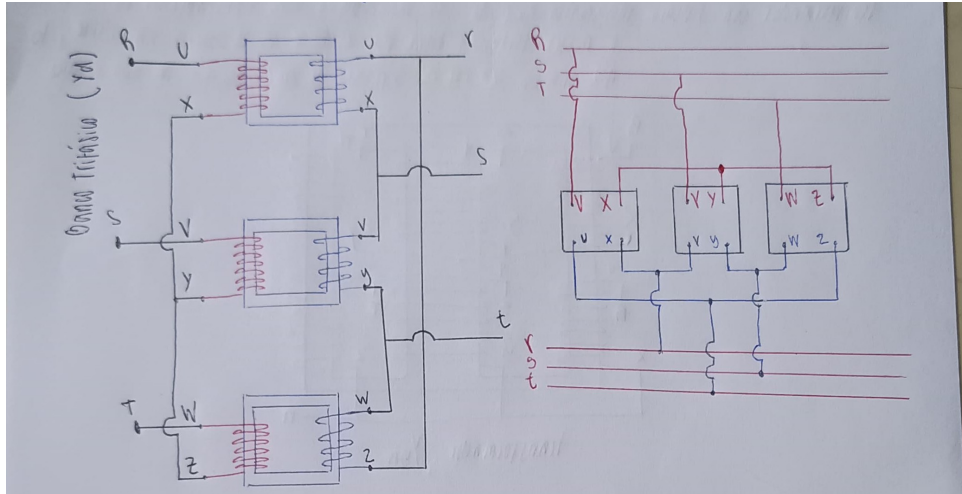
2.1.1. Transformador con sistema magnético acoplado

Es denominado como transformador de **tres columnas** o **núcleo trifásico**; tiene una asimetría en el circuito magnético, lo que origina que las tres corrientes de excitación no sean iguales.



2.1.2. Transformador con sistema magnético independiente

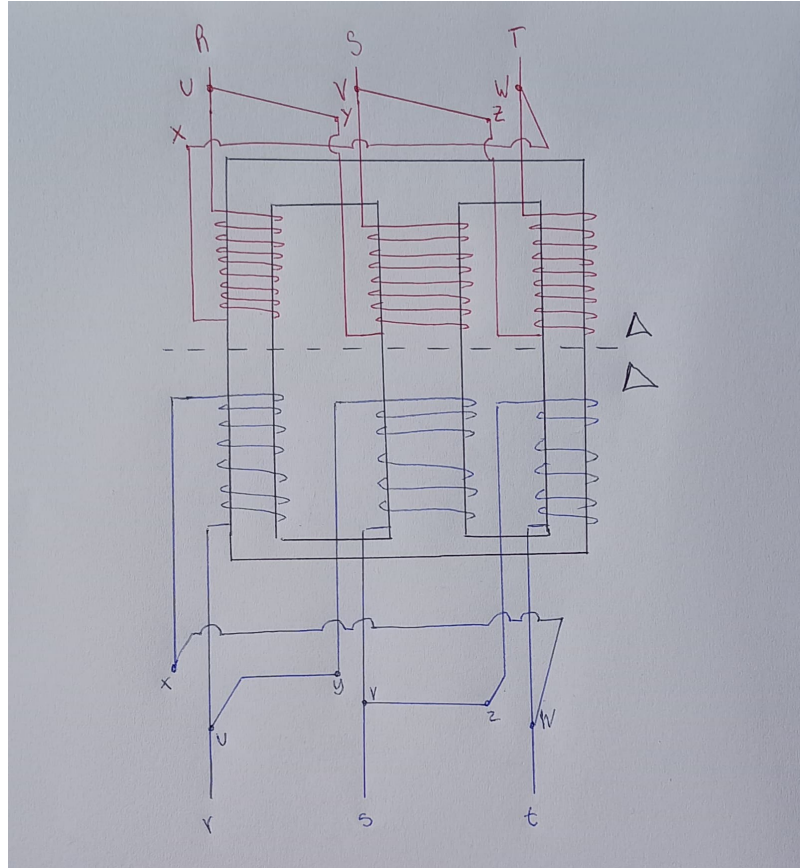
Denominado también banco de transformación trifásica a base de transformadores monofásicos o grupo transformador trifásico. En este caso se tienen tres circuitos magnéticos independientes, por lo que las corrientes de excitación serán iguales



A continuación se desarrollarán las conexiones más utilizadas de transformadores trifásicos.

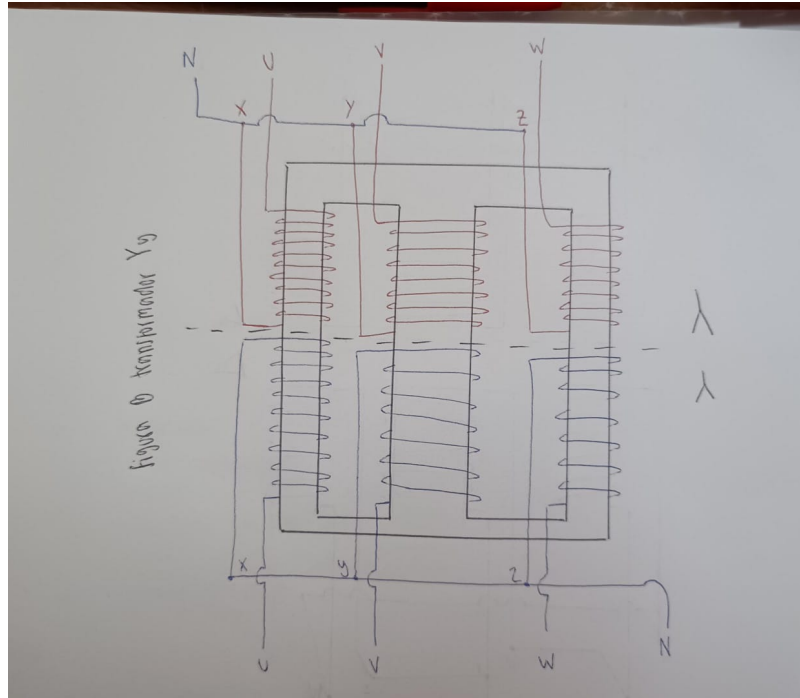
2.2. Conexión triángulo-triángulo (D_d)

Para esta clase de trafa., las 3 fases del bobinado primario y secundario están conectados en triángulo. Esta conexión se expresa abreviadamente con el símbolo D_d .



2.3. Conexión estrella-estrella (Y_y)

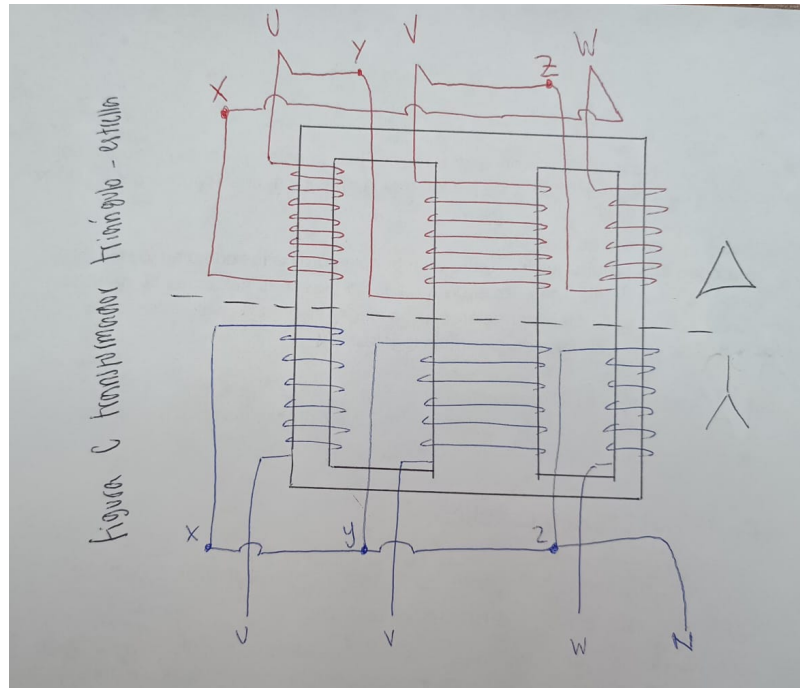
En esta clase de transformador trifásico, las tres fases de ambos bobinados están conectadas en estrella. Esta conexión se expresa con el símbolo Y_y .



La conexión estrella se utiliza cuando la línea tiene neutro, el neutro se emplea siempre en baja tensión, mientras que en alta tensión se usa poco ya que ahorrar en conductor supone en una línea de alta tensión un ahorro muy importante, ya que generalmente las líneas de AT tienen muchos kilómetros de largo.

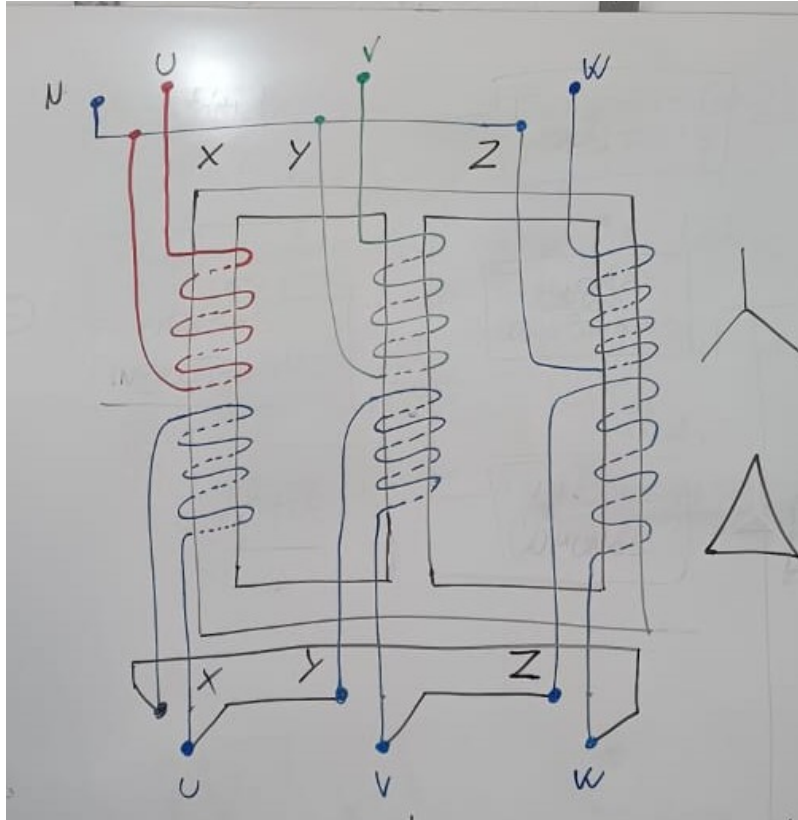
2.4. Conexión triángulo-estrella (D_y)

En esta clase de transformador trifásico las tres fases del bobinado primario están conectadas en triángulo, mientras que las tres fases del bobinado secundario están en estrella. Ésta conexión se expresa con el símbolo D_y .



2.5. Conexión estrella-triángulo (Y_d)

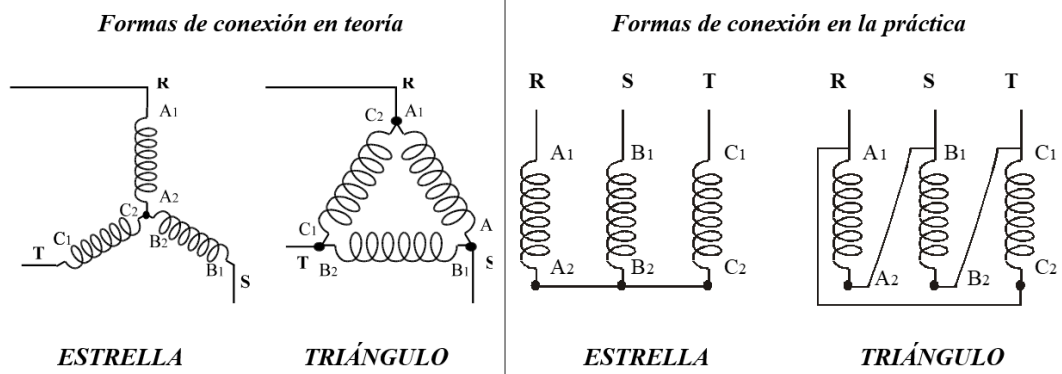
En el transformador estrella-triángulo las tres fases del bobinado primario están conectadas en estrella, mientras que las tres fases del bobinado secundario lo están en triángulo. Ésta conexión es expresada abreviadamente por el símbolo Y_d .



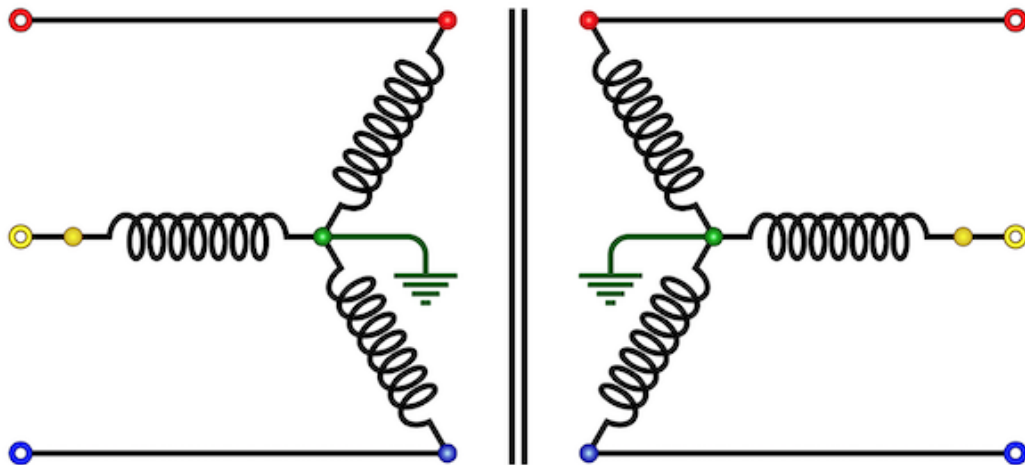
2.6. Representación de las tensiones e intensidades en las conexiones más usuales de transformadores trifásicos

Para tener en cuenta, en la representación de las conexiones, la relación de transformación se aplicará de forma similar que en los transformadores monofásicos.

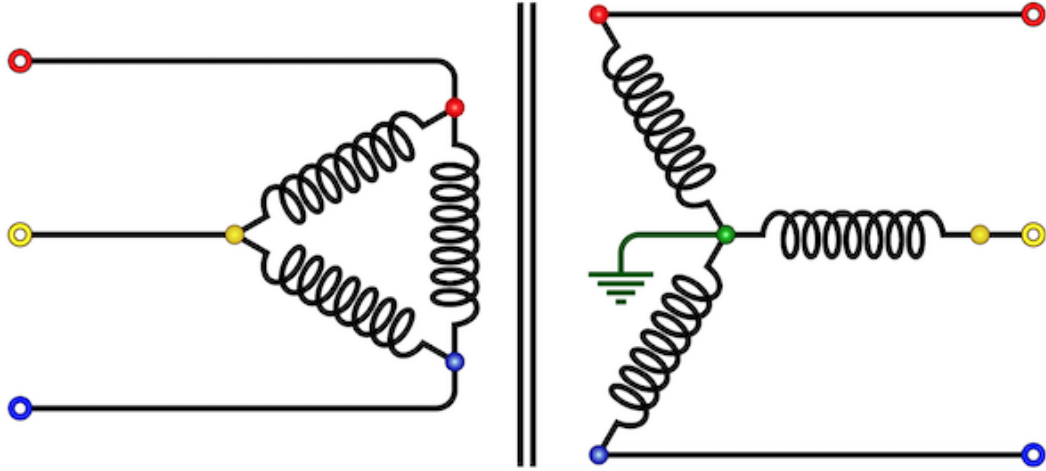
$$1. Y\Delta - Y_d$$



$$2. YY - Y_y$$



$$3. \Delta Y - D_y$$



Para la conexión estrella, tenemos que las tensiones de fase y línea primarias siguen la relación

$$V_L = \sqrt{3}V_F$$

Y las intensidades

$$I_L = I_F$$

Para la conexión en triángulo, las tensiones de fase y línea son iguales

$$V_L = V_F$$

y las intensidades siguen la relación

$$I_L = \sqrt{3}I_F$$

En un transformador tenemos la relación de transformación

$$R_t = \frac{I_{2L}}{I_{1L}} = \frac{V_{1L}}{V_{2L}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.1)$$

Para el ejemplo del triángulo-estrella (ΔY), podemos hallar las intensidades y tensiones de fase y línea

$$\begin{aligned} I_{1L} &= \sqrt{3}I_{1F} \\ V_{1L} &= V_{1F} \end{aligned}$$

Así, la relación de transformación nos da

$$I_{2L} = I_{1L}R_t \implies I_{2L} = I_{1F}R_t\sqrt{3}$$

La tensión

$$V_{2L} = \frac{V_{1L}}{R_t} \implies V_{2F} = \frac{V_{1L}}{R_t\sqrt{3}}$$

Para un transformador triangulo-triangulo ($\triangle\triangle$) tenemos

$$I_{2L} = I_{1L}R_t \implies I_{2F} = \frac{I_{1L}R_t}{\sqrt{3}} = \frac{I_{1F}R_t}{3}$$

Y la tensión

$$V_{2L} = \frac{V_{1L}}{R_t} \implies V_{2F} = \frac{V_{1F}}{R_t}$$