

CORRIENTES ALTERNAS TRIFÁSICAS

Sistemas polifásicos.

El circuito de c.a. monofásico es adecuado para muchas aplicaciones, pero existen dos campos de la electrotecnia para los cuales no es apropiado: la transmisión de energía y la conversión de la energía electromecánica por medio de máquinas. En el caso de la transmisión de energía, los circuitos monofásicos no hacen el mejor uso del sistema de conducción. En el caso de conversión de la energía, las máquinas monofásicas ofrecen una cupla pulsante, funcionan con un factor de potencia muy pobre y a menudo requieren dispositivos adicionales para el arranque. Esto se supera mediante el uso de un sistema polifásico, que puede ser bi o trifásico.

En la actualidad, los sistemas monofásicos se utilizan solamente en las instalaciones de alumbrado y de calefacción doméstica aunque casi siempre son parte de un sistema de distribución trifásica. Los sistemas trifásicos se aplican para la casi totalidad de las necesidades industriales, incluso los circuitos monofásicos domésticos, mientras que los circuitos bifásicos encuentran aplicación en los servomecanismos. En los sistemas de conversión de la corriente eléctrica continua se aplican frecuentemente sistemas hexafásicos y aún dodecafásicos, aunque se trata de sistemas de uso aislado. Otros sistemas polifásicos posibles no han tenido difusión.

Sistemas trifásicos.

. Generación de fuerzas electromotrices trifásicas. Si en un campo magnético se hacen girar simultáneamente tres bobinas desplazadas entre sí 120°, en cada una de ellas se inducirá una f.e.m. variable, sinusoidal, desplazada de cada una de las otras 120° (Fig..1)

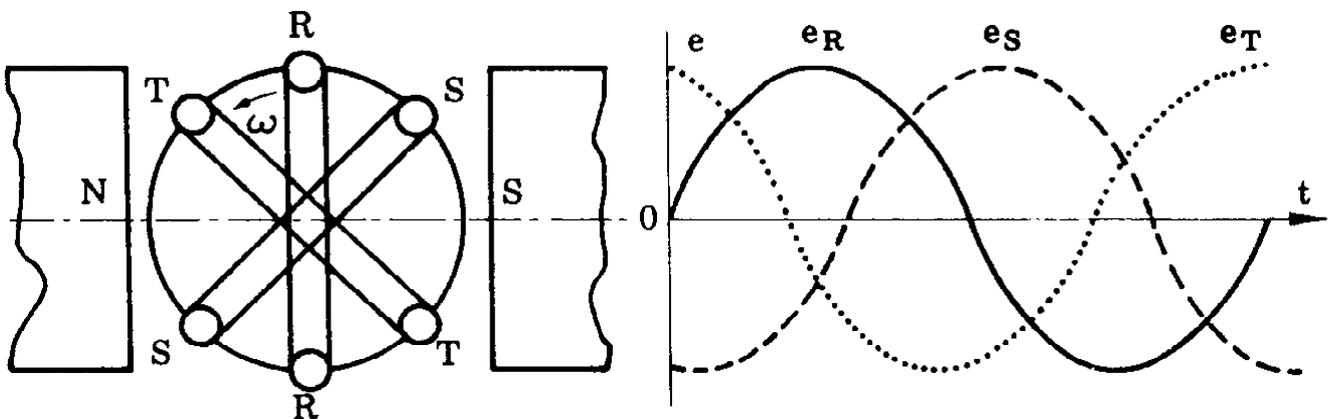


Fig. 1.

Generador trifásico simple y curvas de las fuerzas electromotrices.

Las bobinas de los sistemas trifásicos se designan con las letras R, S y T. Para la disposición mostrada, las f.e.ms. alcanzan su valor máximo primero en la bobina R, luego en la S y por último en la T. Esta secuencia, R, S, T, es la adoptada generalmente como norma. Los extremos de las bobinas se denominan principio y fin y se señalan con las letras U, V y W y X, Y y Z, respectivamente. Así el principio de la bobina R será U y su fin X. Para la bobina S serán V e Y y por fin, para la bobina T, serán W y Z. La secuencia de fases en los alternadores es constante, ya que sus rotores giran siempre en el mismo sentido.

Es importante que en las bobinas se mantenga la polaridad, esto es, que el sentido positivo de las corrientes vaya desde el principio hacia el fin de cada bobina en el mismo instante, o viceversa. Si esto no se cumple, o sea que, si en una de las bobinas el sentido positivo es contrario al de las otras dos, quedará destruida la simetría de las ondas resultantes, que es una de las características principales del sistema trifásico.

El caso general en un sistema trifásico es el de generar un sistema completamente simétrico, en el cual cada una de las f.e.ms. tiene el mismo valor eficaz. Esto se obtiene usando bobinas idénticas en todas las fases; por lo tanto, la f.e.m. máxima será la misma en cada una de ellas.

Tomando la bobina de la fase R como referencia

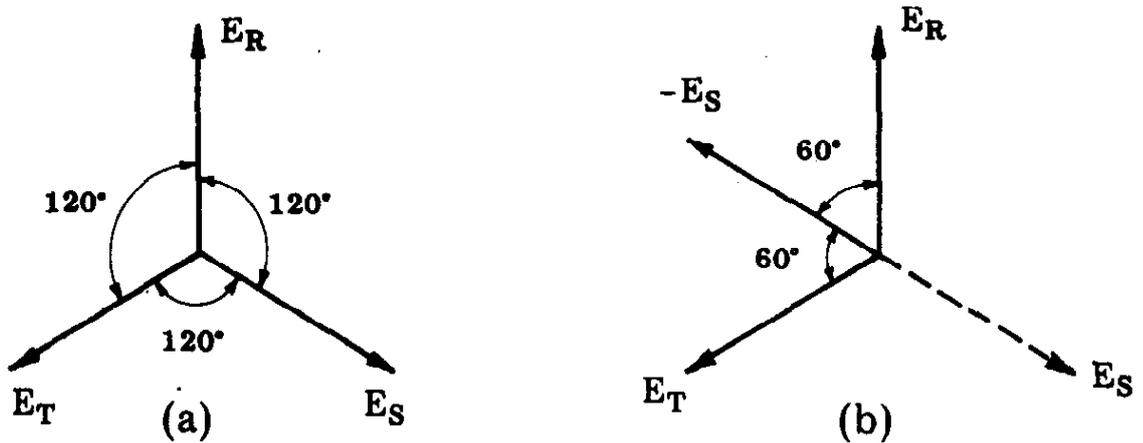


Fig. 2.

- (a) Diagrama fasorial de un sistema trifásico.
- (b) Efecto de la conexión incorrecta de una fase.

$$e_R = E_m \text{ sen } \varphi$$

La f.e.m. de la fase S atrasa de 120° de aquella y por lo tanto la f.e.m.i. en ella está dada por

$$e_S = E_m \text{ sen } (\varphi - 120^\circ)$$

La f.e.m. de la fase T atrasa otros 120° adicionales de la f.e.m. e_R , luego,

$$e_T = E_m \text{ sen } (\varphi - 240^\circ)$$

El diagrama fasorial de la figura 2. (a) muestra las tres tensiones monofásicas, desplazadas entre sí de 120° , suministradas por un generador de corriente trifásica.

El diagrama fasorial de la figura 2. (b) ayuda a comprender el efecto producido por la conexión incorrecta de una fase. El diagrama demuestra que la asimetría total impide el uso de ese sistema.

TRIÁNGULO DE LOS ARROLLAMIENTOS TRIFÁSICOS

Conexión en **triángulo de los arrollamientos trifásicos**. Los tres arrollamientos R, S y T, de la figura 1. correspondientes a las tres fases de un sistema trifásico (llamados también fases, para abreviar) por conveniencia pueden representarse de la manera que se muestra en la figura 3, donde las tres fases se muestran aisladas cada una de las otras. fases.

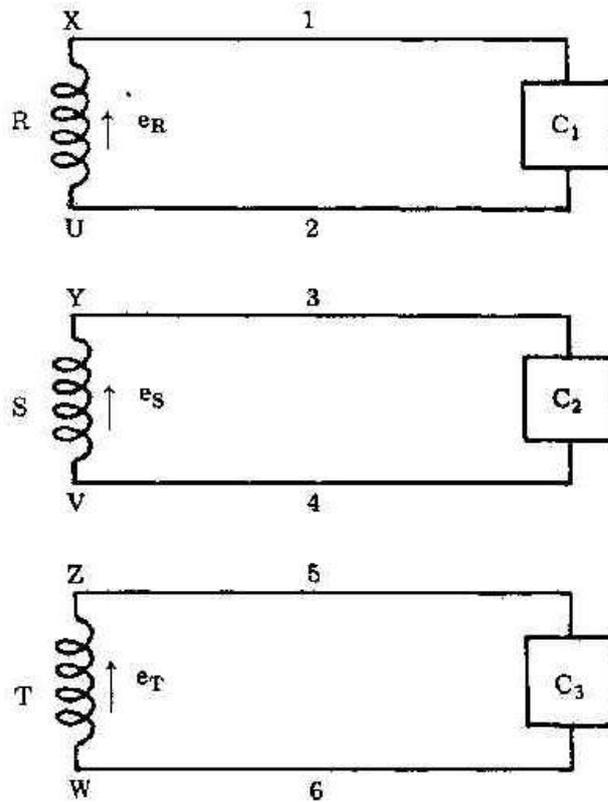


Fig. 3.

Arrollamientos trifásicos con seis conductores de línea, C1 , C2 Y C3 representan cargas conectadas a las respectivas fases

Las f.e.ms. están representadas por las flechas e_R , e_S y e_T Y se suponen positivas porque se dirigen desde el principio hacia el fin de las bobinas. Esta disposición necesita seis conductores de línea, lo cual resulta engorroso y de elevado costo. Por lo tanto merece considerarse como puede ser simplificada.

Una se U con Y, reemplazando los conductores 2 y 3 por uno solo,. Procédase en forma similar uniendo V con Z y reemplazando por uno solo los conductores 4 y 5.

Antes de conectar W con X, se probará que la f.e.m. resultante entre estos dos últimos puntos es igual a cero en cualquier instante, de manera que no se establecerá ninguna corriente cuando ellos se conectan (Fig. 4)

El valor instantáneo de la f.e.m. total, que actúa desde W hacia X es

$$e_R + e_S + e_T = E_m [\text{sen } \varphi + \text{sen } (\varphi - 120^\circ) + \text{sen } (\varphi - 240^\circ)] =$$

$$E_m (\text{sen } \varphi + \text{sen } \varphi \cdot \cos 120^\circ - \cos \varphi \cdot \text{sen } 120^\circ + \text{sen } \varphi \cdot \cos 240^\circ - \cos \varphi \cdot \text{sen } 240^\circ) =$$

$$E_m (\text{sen } \varphi - 0,5 \text{sen } \varphi - 0,866 \cos \varphi - 0,5 \text{sen } \varphi + 0,866 \cos \varphi) = 0$$

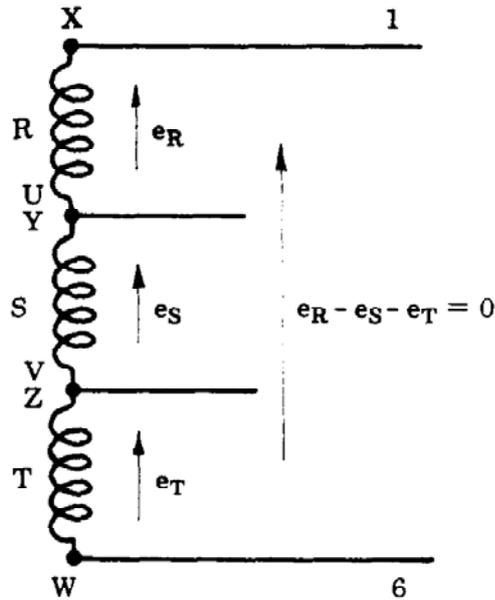


Fig. 4
 F.e.m. resultante en un arrollamiento conectado como malla (triángulo o delta)

Como esta condición se cumple para cada instante, se deduce que X e Y pueden unirse, como se ve en la figura 5, sin que se establezca la circulación de ninguna corriente en el circuito. Los conductores de línea (tres) se conectan a los nodos así formados.

Es útil considerar los valores y los sentidos reales de las f.e.ms. en un instante dado. Por ejemplo, en el instante P, la f.e.m. generada en la fase R es positiva (Fig.1) y está representada en la figura 5 por PL, que actúa desde U hacia X. La f.e.m. en la fase S es negativa y está representada por PM, que actúa desde Y hacia V y la f.e.m. en la fase T, también es negativa y está representada por PN que actúa desde Z hacia W. Pero la suma de PM y PN es exactamente igual a PL, en consecuencia, la suma algebraica de las f.e.ms. en la malla cerrada formada por los tres arrollamientos es cero.

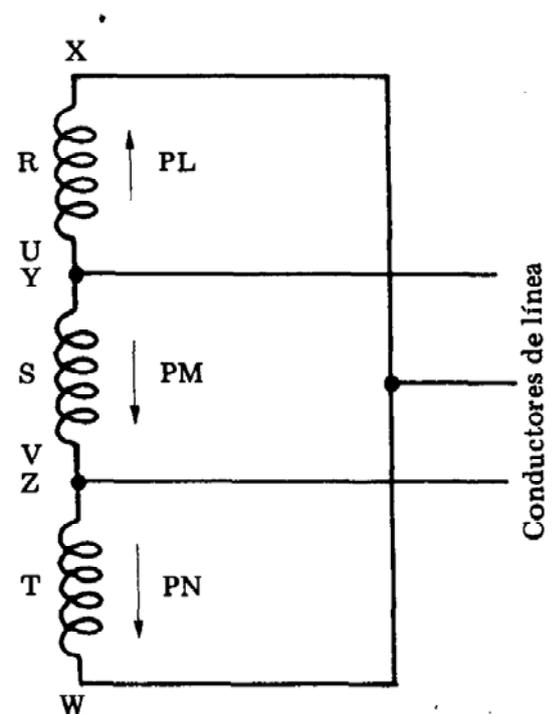


Fig. 5
 Conexión de arrollamientos en triángulo o delta.

Debe recordarse que las flechas de la figura 5. indican los sentidos de las f.e.ms. para un instante dado, en tanto que las flechas de la figura 4. representa el sentido positivo de las f.e.ms.

El circuito deducido en la figura 5 usualmente se dibuja en una de las formas representadas en las figuras 6 (a) y (b). Esta forma de conexión se conoce como conexión triángulo. También se la llama conexión de malla o conexión delta, por su similitud con la letra mayúscula griega del mismo nombre, que también sirve como símbolo para designarla.

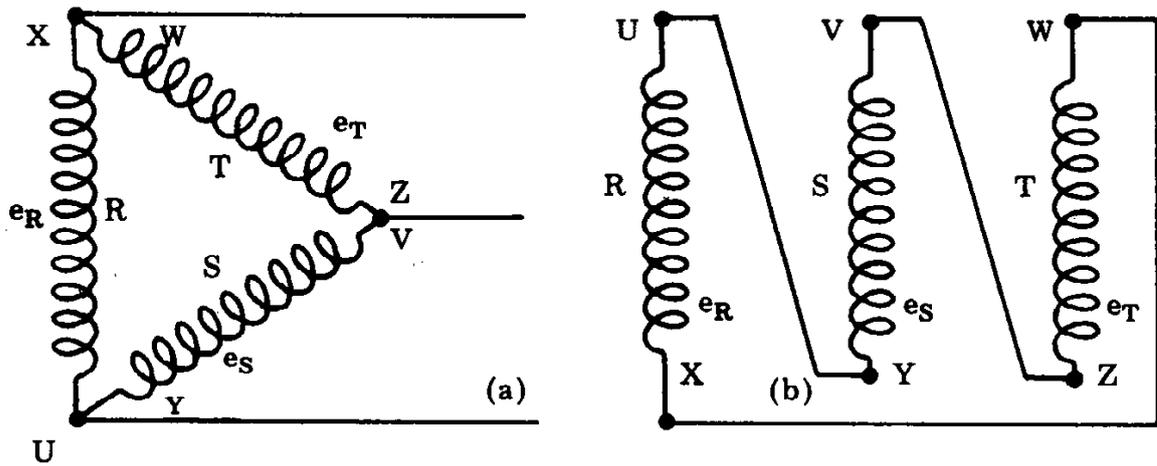


Fig. 6.
 Representaciones convencionales de los arrollamientos conectados en triángulo.

Se advierte que en la figura 6 (a), la fase R está conectada a la fase T en lugar de la fase S, como en la figura 5. En realidad, la forma de agrupar las fases es indiferente siempre que se respete la secuencia, conectando el principio de una fase con el final de la siguiente, de modo que las flechas que representan los sentidos positivos de las f.e.ms. apunten en el mismo sentido alrededor de la malla formada por las tres bobinas.

Conexión en estrella de los arrollamientos trifásicos. Vuélvase a la figura 3. y conéctense entre sí, en un punto N, los principios U, V y W de las tres bobinas, de modo que los conductores 2, 4 y 6 queden reemplazados por un solo conductor NM, tal como muestra la figura 7.

Como se ha supuesto que la corriente es positiva cuando circula desde el principio hacia el fin de cada bobina, también puede considerarse positiva cuando lo hace en cada fase en el mismo sentido, como indican las flechas de la figura 7

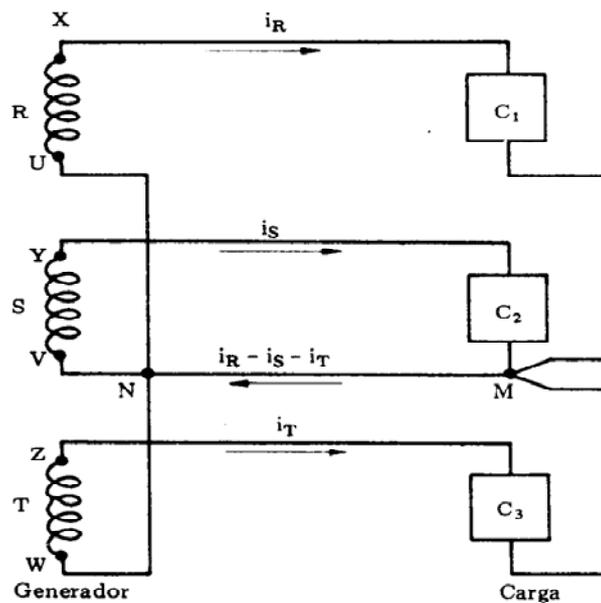


Fig. 7.
 Conexión en estrella de arrollamientos trifásicos.

Si i_R , i_S e i_T son los valores instantáneos de las corrientes en las tres fases, en el conductor común MN, el valor instantáneo de la corriente es

$$i_R + i_S + i_T$$

y su sentido positivo es desde M hacia N.

Esta disposición se conoce como sistema conectado en estrella, con cuatro conductores (o conexión estrella a cuatro hilos) y es la representada en la figura 8. El punto de unión o nodo 0, se llama punto neutro o centro de estrella. Los motores trifásicos se conectan a los conductores de línea R, S y T, mientras que los consumos monofásicos, como lámparas, calefactores, aparatos del hogar, etc. generalmente se conectan entre los conductores de línea y el conductor neutro, como sucede con C_1 , C_2 y C_3 . La carga total debe estar distribuida entre las tres líneas en forma tan uniforme como sea posible. Si las tres cargas son exactamente iguales, las corrientes de fase tienen el mismo valor máximo o de pico, I , y la diferencia de fase es de 120° . Por ello, si el valor instantáneo de la corriente en la carga C_1 , está representado por

$$i_1 = I_m \cdot \text{sen } \varphi$$

la corriente instantánea en C_2

$$i_2 = I_m \text{ sen } (\varphi - 120^\circ)$$

y la corriente instantánea en C_3

$$i_3 = I_m \text{ sen } (\varphi - 240^\circ)$$

Por lo tanto, el valor instantáneo de la corriente resultante en el neutro, es igual a

$$i_1 + i_2 + i_3 = I_m \text{ sen } \varphi + I_m \text{ sen } (\varphi - 120^\circ) + I_m \text{ sen } (\varphi - 240^\circ) = I_m \cdot 0 = 0$$

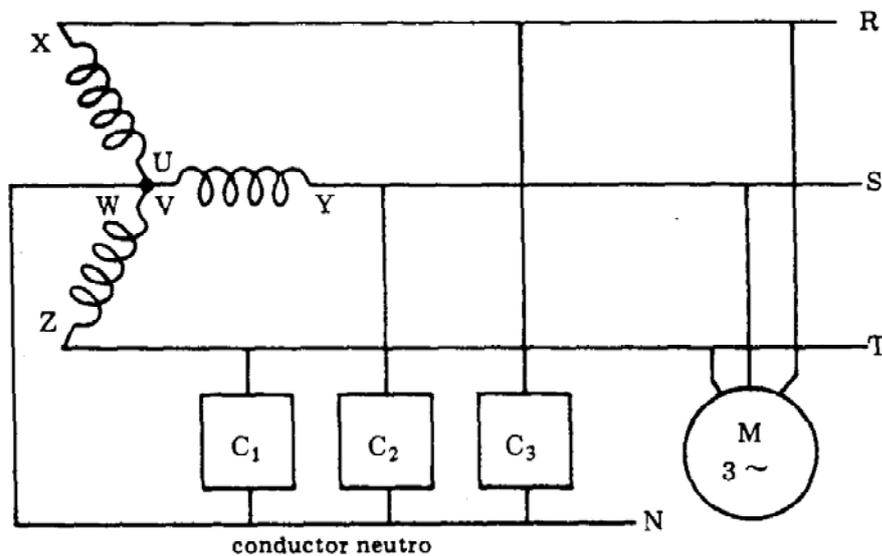


Fig. 8.

Sistema conectado en estrella con cuatro hilos.

O sea que con cargas equilibradas, la corriente resultante en el conductor neutro es cero en todos los instantes; por lo tanto este conductor puede ser eliminado, dando lugar así al sistema conectado en estrella con tres conductores, que se muestra en la figura 9.

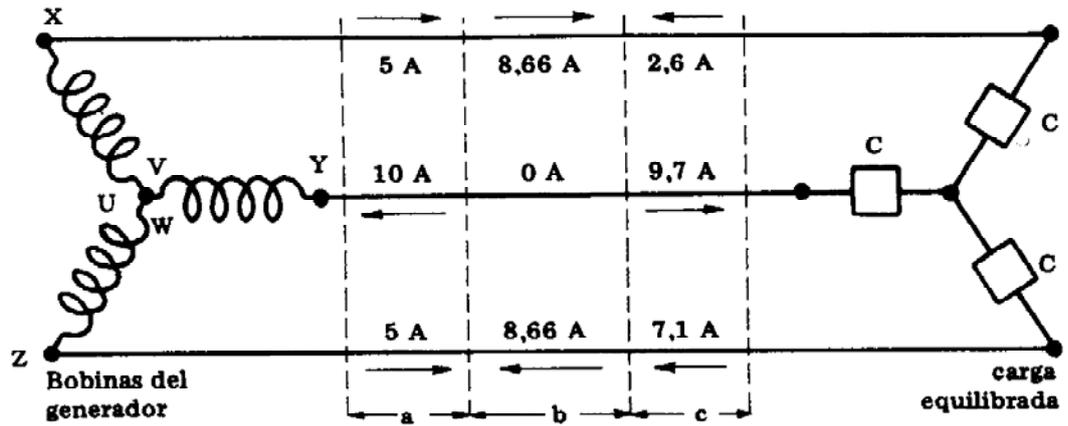


Fig. 9.
 Sistema conectado en estrella de tres hilos, con carga equilibrada.

Cuando se considera la distribución de corriente en un sistema trifásico de tres conductores, es útil tener en cuenta que:

- a) Las flechas colocadas junto a las cantidades del sistema, o sus símbolos, como en la figura 9. indican el supuesto sentido positivo de las cantidades y no su sentido en un instante dado.
- b) La corriente que circula hacia afuera en uno o dos conductores, es igual a la que retorna en el conductor o conductores.

La última afirmación requiere mayores detalles. Supóngase que las curvas de la figura 10. representan las tres corrientes, desfasadas de 120' entre sí y cuyo valor máximo es de 10 A. En el instante a, las corrientes en las fases R y S son de 5 A cada una, mientras que la corriente en la fase T es -10 A. Estos valores están indicados en la figura 10.2.3.3.; por ejemplo; en las fases R y T circulan 5 A hacia afuera y por la fase S retornan 10 A.

En el instante b, la corriente en S es cero, la que circula por R es 8,66 A y la que circula por T es -8,66 A, o sea que 8,66 A salen por la fase R y vuelven por la fase T.

En el instante c, las corrientes en R, S y T son: -2,6 A, 9,7 A y 7,1 A respectivamente, o sea que 9,7 A circulan hacia afuera, en la fase S y retornan por las fases R (2,6 A) y T (7,1 A).-

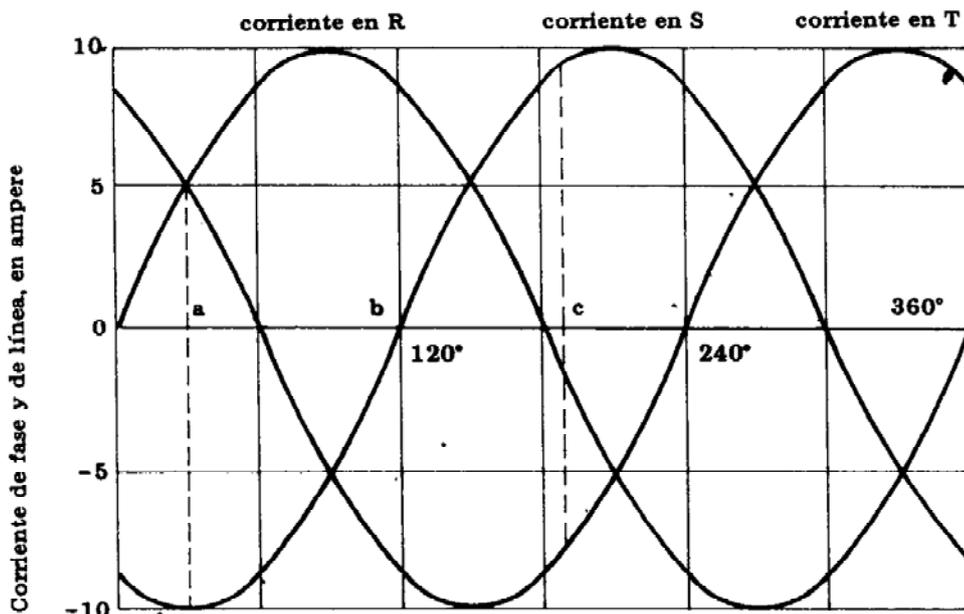


Fig. 10.
 Curvas de corriente en un sistema trifásico balanceado.

Se observa claramente que la distribución de las corrientes entre las tres líneas varía continuamente, pero en cualquier instante la suma algebraica de las corrientes es igual a cero.

Relación entre las tensiones de línea y de fase y las corrientes en un sistema conectado en estrella.

Supóngase que la f.e.m. en cada fase es positiva cuando actúa desde el punto neutro hacia afuera, de modo que los valores eficaces de la f.e.ms. generadas en las tres fases pueden ser representados por E_{NX} , E_{NY} y E_{NZ} , como se indica en la figura 10.2.4.1 (a) y (b). El valor de la f.e.m. que actúa desde Y, a través de N hasta X es el fasor diferencia de E_{NX} y E_{NY} . Por lo tanto, E_{YN} se dibuja igual y opuesto a E_{NY} , Y se suma con E_{NX} , obteniéndose E_{YNX} , como la f.e.m. que actúa desde Y hacia R a través de N. Téngase en cuenta que el triple subíndice es necesario para indicar sin ambigüedades el sentido positivo de la f.e.m.

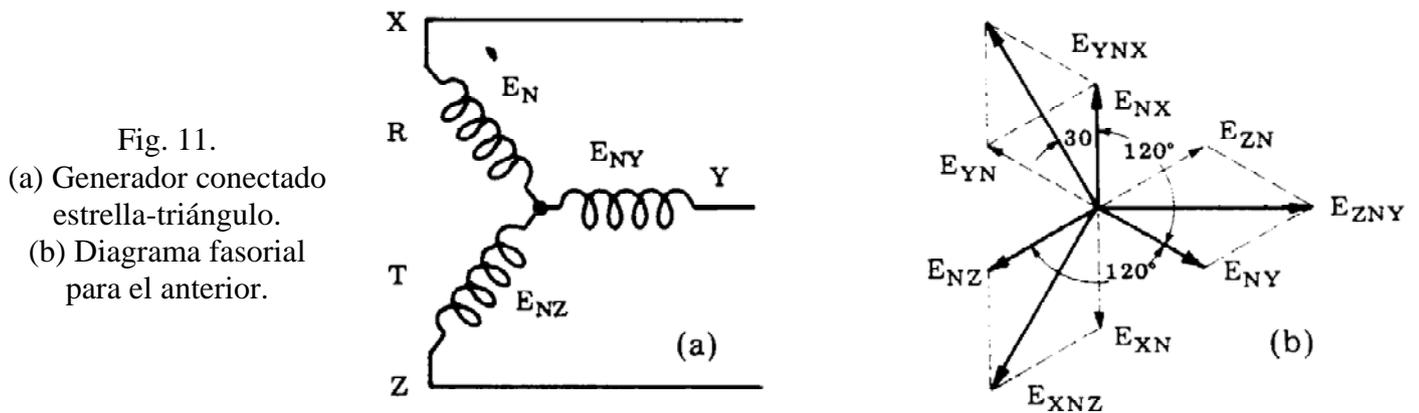


Fig. 11.
 (a) Generador conectado estrella-triángulo.
 (b) Diagrama fasorial para el anterior.

Habiendo decidido que YNX es el sentido positivo de la f.e.m. de línea entre Y y R, se debe respetar igual secuencia para las otras f.e.ms. entre las otras líneas, o sea la secuencia debe ser YNX, XNZ y ZNY. E_{XNZ} se obtiene sustrayendo E_{NX} de E_{NZ} y E_{ZNY} se obtiene sustrayendo E_{NZ} de E_{NY} , como se ve en la figura 11. (b). Observando la simetría de este diagrama, es fácil deducir que las tensiones de línea son iguales y se encuentran espaciadas de 120°. Además, como los lados de todos los paralelogramos son iguales en longitud, las diagonales los interceptan a 90°. Además, ellas bisectan los ángulos de sus receptivos paralelogramos y como el ángulo entre E_{NX} y E_{YN} es 60°

$$E_{YNX} = 2 E_{NX} \cdot \cos 30^\circ = \sqrt{3} E_{NX}$$

o sea que la tensión de línea = 1,73 por la tensión de fase

En la figura 11. (a) es obvio que en un sistema conectado en estrella la corriente en un conductor de línea es la misma que la de la fase a la que se encuentra conectado ese conductor. Por lo tanto, en general.

Si $U_l =$ d.d.p. entre dos conductores cualesquiera de línea = tensión de línea, y $U_f =$ d.d.p. entre un conductor de línea y el punto neutro = tensión de fase (o tensión de estrella).

y si I_L e $I_f =$ corriente de línea y corriente de fase, respectivamente, para un sistema conectado en estrella.

$$U_L = 1,73 \cdot U_f \quad (U_L = \sqrt{3} \cdot U_f); \quad I_L = I_f$$

Relaciones entre las tensiones y corrientes de línea y de fase en un sistema conectado en triángulo, con carga equilibrada.

Sean I_1 , I_2 e I_3 los valores eficaces de las corrientes de fase que tienen sus sentidos positivos indicados por las flechas en la figura 12. Como se supone que la carga es equilibrada, estas corrientes son iguales en magnitud y difieren 120° en fase, como muestra la figura 13.

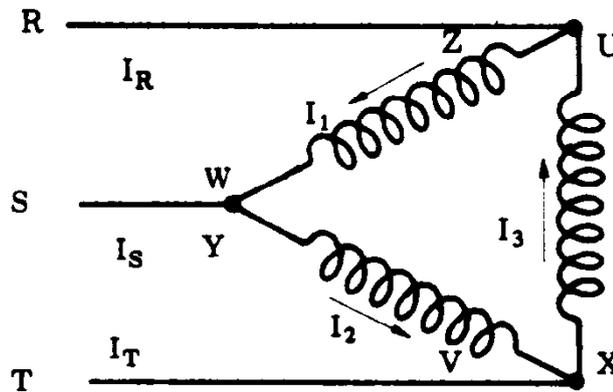


Fig. 12

Sistema conectado en triángulo con carga equilibrada.

En la primera figura se ve que I_1 cuando es positiva circula alejándose del conductor de línea R, en tanto que I_3 , cuando es positiva, circula hacia él.

Por lo tanto, I_R se obtiene por sustracción entre I_3 e I_1 , como en la figura 13. De igual manera, I_S es el fasor diferencia entre I_3 e I_2 . De la última figura mencionada, se deduce que las corrientes de línea son iguales en magnitud y difieren en fase, de 120° entre sí. También

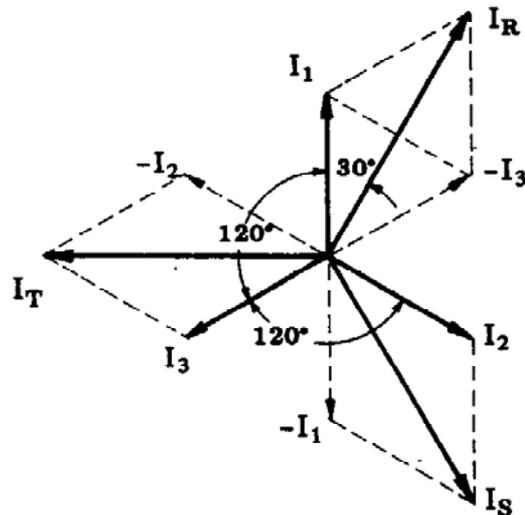
$$I_R = 2 I_1 \cdot \cos 30^\circ = \sqrt{3} I_1$$

Por lo tanto, para un sistema conectado en triángulo, con carga equilibrada, la corriente de línea = 1,73 por corriente de fase o sea,

$$I_L = 1,73 I_f$$

Fig. 13.

Diagrama fasorial para la figura 12.



de la figura 12. se deduce fácilmente que en un sistema Conectado en mafia, o delta, o triángulo, como habitualmente se lo denomina, las tensiones de línea y de fase son la misma cosa, o sea que

$$U_l = U_f$$

Potencia en maquinas trifásicas

La potencias en una fase de una máquina trifásica es:

$$P_f = U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi$$

La potencia de línea es

$$P_L = P_b = 3 P_f = 3 U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi$$

→ En la conexión **estrella** de la maquina trifásica es

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_f \quad \rightarrow \quad U_f = \frac{U_L}{\sqrt{3}} \quad \text{y} \quad I_f = I_L$$

$$P_L = 3 \cdot \frac{U_L}{\sqrt{3}} \cdot I_L \cos \varphi$$

$$(3 = \sqrt{3} \sqrt{3}) \quad \Rightarrow \quad P_L = \sqrt{3} \cdot U_f \cdot I_L \cos \varphi \quad \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}}$$

→ En la conexión **triángulo** de las maquinas trifásicas

$$[P_f = U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi] \quad \text{y} \quad [P_L = 3 P_f = 3 U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi]$$

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_f \quad \text{y} \quad U_f = U_L$$

$$I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad \rightarrow \quad P_L = 3 U_L \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cos \varphi$$

$$(3 = \sqrt{3} \sqrt{3}) \quad \Rightarrow \quad P_L = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cos \varphi \quad \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}}$$

La potencia total o potencia de línea de una maquina trifásica es exactamente igual ya sea que este conectado en estrella o en triángulo