



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# Configuración estrella triángulo. Aplicación industrial

<b>Apellidos, nombre</b>	<b>Pérez Cruz, Juan</b> (juperez@die.upv.es)
<b>Departamento</b>	<b>Departamento de Ingeniería Eléctrica</b>
<b>Centro</b>	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Universidad Politécnica de Valencia



## 1 Resumen

En este artículo se exponen las 2 formas clásicas de conexionado de un motor (estrella y/o triángulo), se analizan tanto las tensiones aplicables en cada caso y su repercusión en corriente demandada de la línea.

Por otro lado, se plantea el método clásico de arranque en estrella-triángulo, analizando mediante las oportunas gráficas de tensión y corriente los efectos que provocan en las líneas de alimentación y los efectos sobre el motor alimentado.

En ambos casos los planteamientos presentados son mediante un ejemplo práctico que permite de forma muy sencilla y evidente extraer todas las conclusiones necesarias para una toma de decisión razonada a la hora de conectar motores a la red de alimentación.

## 2 Introducción

Este trabajo tiene una eminente carga pedagógica y de carácter práctico, ya que se trata de familiarizar a los alumnos en la aplicación de las configuraciones (estrella-triángulo) de receptores eléctricos más estudiadas y planteadas a lo largo de diversas asignaturas. Desde el punto de vista de aplicación, el alumno desconoce la realidad industrial que hace necesario la aplicación de estos métodos o configuraciones.

Así pues, este trabajo intenta justificar los estudios realizados en este campo y refuerza la vertiente educativa mediante el análisis de algunas de sus más importantes aplicaciones industriales.

## 3 Objetivos

Son varios los objetivos planteados con la resolución de este trabajo, todos ellos basados en la educación del alumno mediante el análisis de un único ejercicio práctico. Así los objetivos principales son:

- Establecer la relación entre los valores de la tensión y corriente de línea en un sistema trifásico en el caso de conexión trifásica estrella y conexión triángulo..
- Calcular la reducción de la corriente de arranque de un motor en el caso de un arranque estrella-triángulo frente a un arranque directo.
- Diseñar la maniobra mediante contactores de un "arrancador estrella triángulo".
- Determinar las aplicaciones en las que son necesarias este tipo de automatizaciones.
- Evaluar el efecto de la reducción de tensión durante el transitorio de arranque sobre el par del motor.

Todas las ecuaciones utilizadas son las que normalmente se encuentra en los diferentes tratados de instalaciones y máquinas eléctricas, y en ningún momento se pretende en este trabajos sustituir o incluso deducir de forma empírica dichas expresiones, disponibles en la bibliografía que se adjunta.



## 4 Desarrollo

Se desarrolla el trabajo siguiendo las pautas planteadas en los objetivos, por lo que se repasan los conceptos básicos de manera que el alumno puede seguir sin dificultad todo el trabajo.

### 4.1 Fundamentos básicos de las configuraciones estrella-triángulo

Se repasan los conceptos de la configuración estrella y de la configuración triángulo, y para que se pueda observar su repercusión industrial se plantean mediante un ejemplo práctico y con receptores cercanos al alumno, tal como serían unas bombillas.

a) Configuración estrella, figura 1:

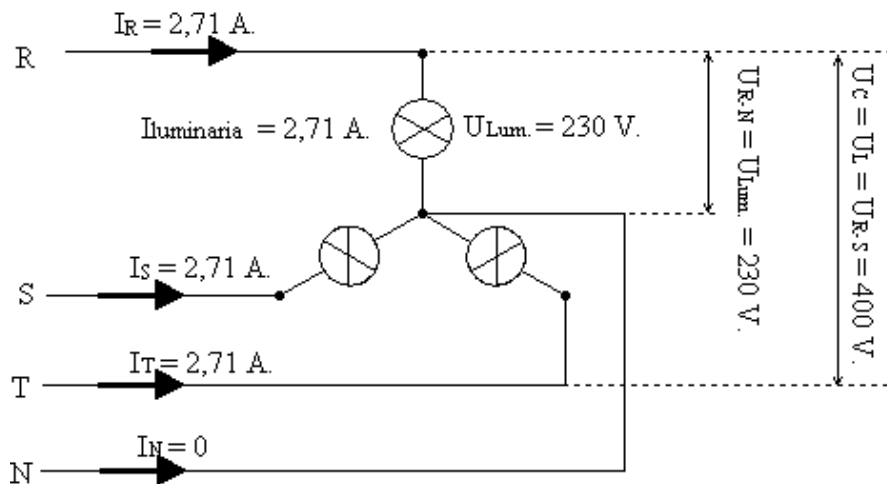


Figura 1. Configuración estrella

En la figura 1, se alimenta desde una línea eléctrica trifásica convencional a un conjunto formado por tres grupos de lámparas (representado cada grupo por una lámpara) y se pueden observar los valores de corriente (2,71 amperios) que demanda cada grupo de lámparas como la tensión que se le debe de aplicar (230 voltios). Así mismo se ven los valores de corriente (2,71 amperios) y de tensión (400 voltios) en la línea de alimentación.

b) Configuración triángulo, figura 2:

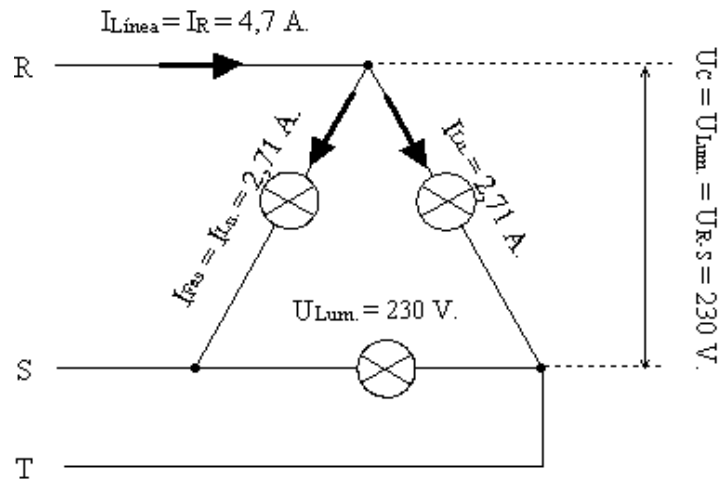


Figura 2. Configuración Triángulo

En la figura 2, se alimenta de nuevo desde una línea eléctrica trifásica convencional al mismo conjunto de lámparas (representado cada grupo por una lámpara) y se pueden observar los valores de corriente (4,7 amperios) y en la tensión a aplicar ahora (230 voltios), lo que hace que un mismo grupo de cargas (por ejemplo bombillas) demanden corriente en la línea diferentes.

## 4.2 Configuración estrella-triángulo en un motor convencional

Los motores como cualquier otro receptor están formados por un conjunto de receptores monofásicos (similares a las bombillas) que son las bobinas, que pueden configurarse tanto en estrella como en triángulo, con las consecuentes variaciones de consumo en la línea de alimentación eléctrica, según la figura 3.

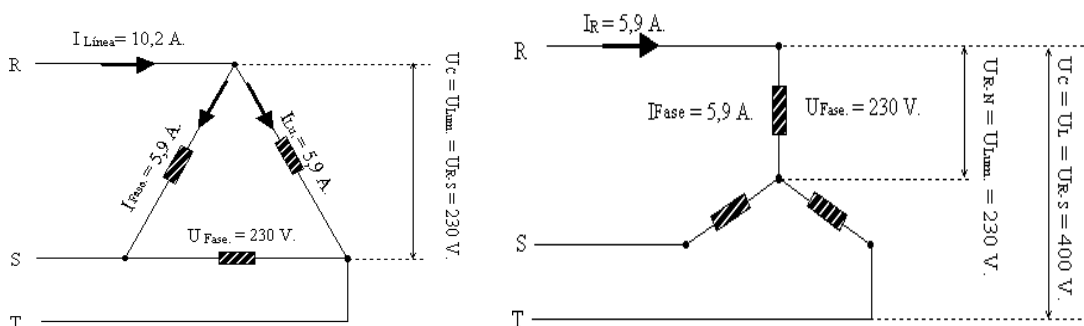


Figura 3. Configuración estrella y configuración triángulo en un motor

En los motores, para poder realizar este tipo de cambios en la configuración de sus bobinas, se dispone de una caja de conexionado denominada placa de bornas, en la cual se permite la unión de todas las bobinas, donde (a) es la propia caja, (b) es el detalle de las tres bobinas o conjunto de bobinas y (c) son unas pequeñas

placas (normalmente de cobre) que permiten realizar uno u otro tipo de configuración, ver figura 4.

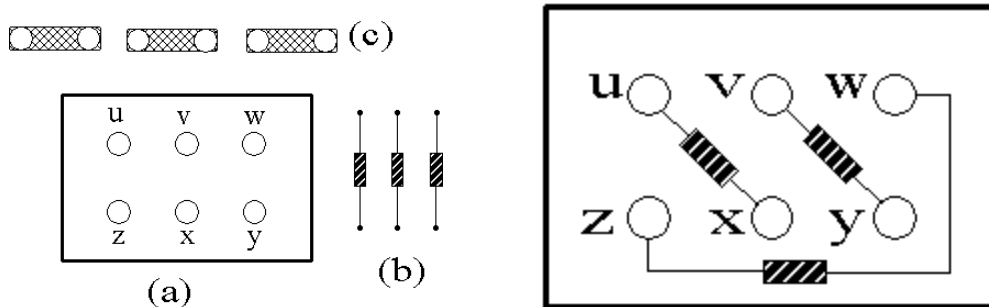


Figura 4. Esquema de conexión en la placa de bornas de las bobinas

En la figura 5 y figura 6, se puede observar el modo de conseguir una u otra configuración, mediante la adecuada colocación de las placas metálicas.

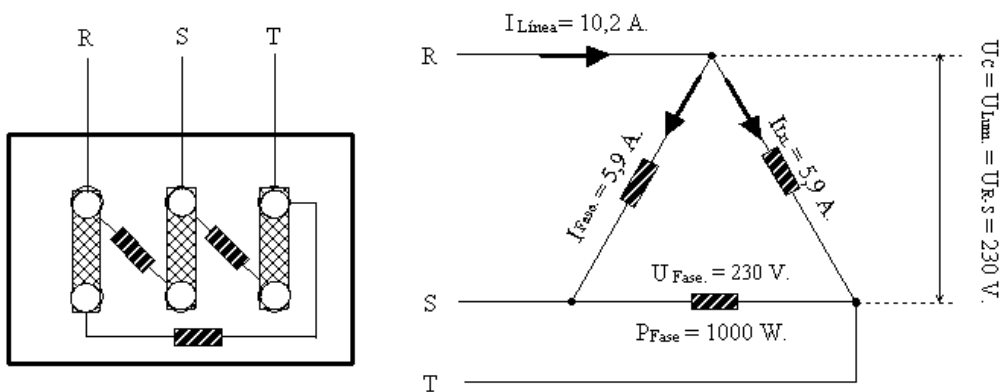


Figura 5. Esquema de conexión triángulo de las bobinas mediante la placa de bornas

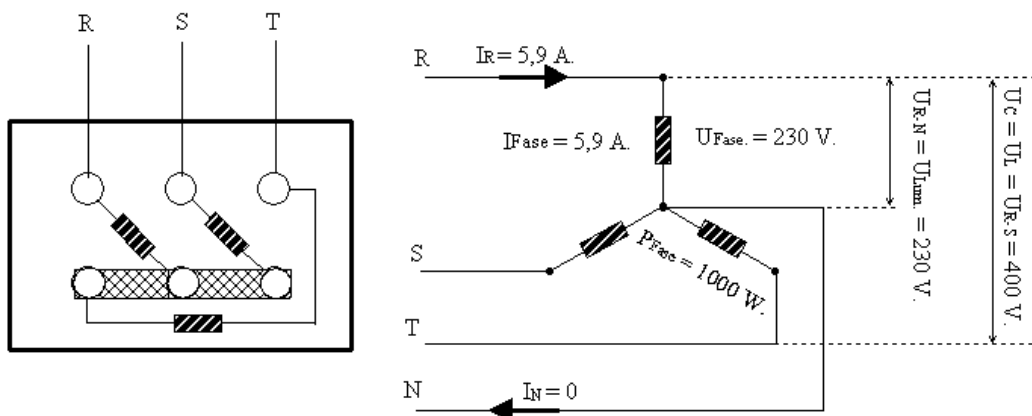


Figura 6. Esquema de conexión estrella de las bobinas mediante la placa de bornas



### 4.3 Repercusión de la corriente de arranque sobre las líneas eléctricas

En un motor convencional industrial, del tipo motor de inducción o motor de jaula de ardilla, la corriente de arranque que pueden llegar a ser entre 4 y 10 veces la corriente normal de funcionamiento. La corriente de fase de un motor asíncrono viene dada por la expresión:

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{cc}^2}}$$

*Ecuación 1. Definición de la corriente demandada.*

En esta expresión se puede considerar prácticamente constantes los valores de tensión de alimentación ( $U_1$ ), y de sus impedancia internas ( $R_1$ ,  $R_2$  y  $X_{cc}$ ), pero sin embargo la variable "s" (denominada deslizamiento) varía desde un valor "1" en el instante inicial del arranque hasta un valor cercano a "0" (entre el 1 y el 3%) en régimen permanente. La variación de este valor es el que nos permite entender que la corriente de arranque de este tipo de máquinas pueda ser relativamente alta, tal como se ha indicado anteriormente.

***Esta variación inicial en la corriente demandada en muchas ocasiones puede ser MUY perjudicial para su entorno, dado que puede provocar caídas de tensión en la línea de alimentación a esta máquina que a su vez en un puedan repercutir en otras máquinas o receptores cercanos, pudiendo ser causa de averías incluso de posibles demandas judiciales sobre la compañía de distribución y alimentación de los receptores o consumos próximos al motor en cuestión. Ver figura 7.***

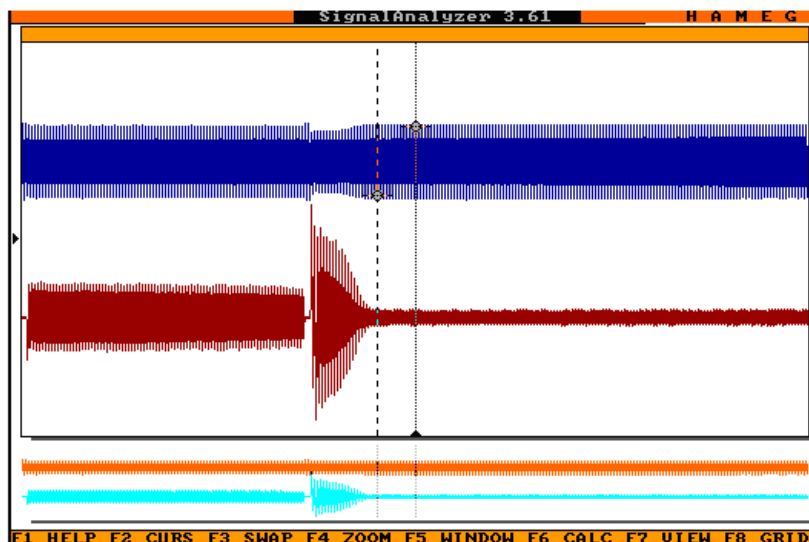


Figura 7. Repercusión de las corrientes de arranque de un motor sobre la línea de alimentación



En la figura 7 se puede estudiar con detalle la repercusión de las corrientes comentadas sobre la línea de alimentación a un motor. En estos gráficos se han querido representar los efectos sin tener en cuenta el valor absoluto de la corriente tanto de funcionamiento convencional como en el momento de establecerse las sobrecorrientes de arranque. Para ello, la maniobra representada es la de un arranque estrella triángulo mal efectuado, donde se cambia de la configuración de estrella a triángulo antes de tiempo, de esta manera se puede analizar en un mismo gráfico, las corrientes elevadas de un hipotético arranque directo (las mayores presentadas), la disminución al efectuar el arranque a tensión reducida (estrella, que es la primera corriente oscilografiada) y finalmente la corriente en régimen normal de trabajo (valor de la corriente en la parte final de la grafica), así como sus repercusiones en la tensión de línea.

En la gráfica se representada las trazas (tanto la superior como la inferior) que han sido obtenidas mediante un osciloscopio, la traza superior se corresponde con la tensión de alimentación a la instalación, en ella se puede apreciar una significativa disminución cerca de su parte central, esta disminución es la caída de tensión que se produce en esos instantes, en los cuales la corriente demandada y circulante por la línea es la mayor posible durante el tiempo de arranque y funcionamiento del motor.

La traza inferior se corresponde con la corriente demandada por el motor y se pueden apreciar tres zonas importantes, unos valores relativamente pequeños (zona con la menor corriente) en la segunda mitad de la representación, la cual se corresponde con el régimen de funcionamiento normal del motor. Justo antes de este periodo, aparece unos valores muy altos de corriente, que se corresponden con los valores de corriente que demanda durante el arranque (en triángulo) y a velocidades bajas de la máquina (donde el deslizamiento "s" es muy alto cercano a la unidad), esta corriente es la que se trataría de evitar. Por último destacar que la primera parte de la grafica inferior (la de corriente) es menor, aunque también a velocidades bajas ("s" cercano a la unidad) pero el motor en este tiempo está en configuración estrella (por lo tanto a tensión reducida).

Desde el punto de vista del estudio en la repercusión de este transitorio de arranque, se puede observar en la traza de arriba (la correspondiente a la tensión), que lo que se que persigue es que, en ningún momento puedan producirse caídas de tensión tan significativas (las mayores).

Hacer que hacer notar que una misma máquina puede generar problemas en una determinada ubicación y sin embargo en otro entorno puede ser prácticamente nula su repercusión, ya que vendrá condicionado su efecto por otros parámetros, tales como son las secciones de las líneas de alimentación, las caídas de tensión permitidas, etc. Pero el efecto comentado suele ser bastante frecuente y en un porcentaje muy alto de aplicaciones se debe de contemplar medidas que palien dicho efecto, que están totalmente reguladas.

#### **4.4 Arranque estrella-triángulo de un motor convencional**

Una vez representado y analizado el efecto de la corriente transitoria de arranque de un motor se pueden estudiar posibles métodos de aminorar este efecto. Para ello existe en la industria diferentes formas de acometer dicha mejora. la práctica totalidad están basadas en la disminución de la tensión a la máquina durante el tiempo de duración. Sin duda por su simplicidad y economía, el mayoritariamente



utilizado es el método de arranque denominado estrella triángulo, siguiendo lo expuesto en los apartados 4.1 y 4.2.

Dado que la máquina o receptor es única así como las características de la línea de alimentación, lo que se hace es en el instante inicial se colocan las bobinas (o devanados) de la máquina en estrella y una vez arracada y a la velocidad normal de funcionamiento se pasan a configuración triángulo.

Un requisito fundamental es que la tensión de funcionamiento de las bobinas del motor, en régimen permanente, debe coincidir con la tensión nominal de la línea de alimentación. Por tanto el modo correcto de funcionamiento de la máquina eléctrica sería en configuración triángulo (ver apartado 4.1). Pero de forma temporal se configura en estrella, por lo que durante este tiempo las bobinas se encuentran alimentadas a tensión reducida y por la expresión (1) la corriente demandada es también reducida, en un valor igual a 3 veces menor de la que realmente demandaría si se hubiese configurado en triángulo (ver apartados 4.1 y 4.2). De nuevo se puede observar con un ejemplo la reducción de corriente comentada. Para un motor cuyos valores de funcionamiento nominal fuesen de 230 voltios y 5,9 amperios y tuviese una sobrecorriente de arranque de 8 veces la nominal, los valores calculados del arranque estrella triángulo se muestran en la figura 8.

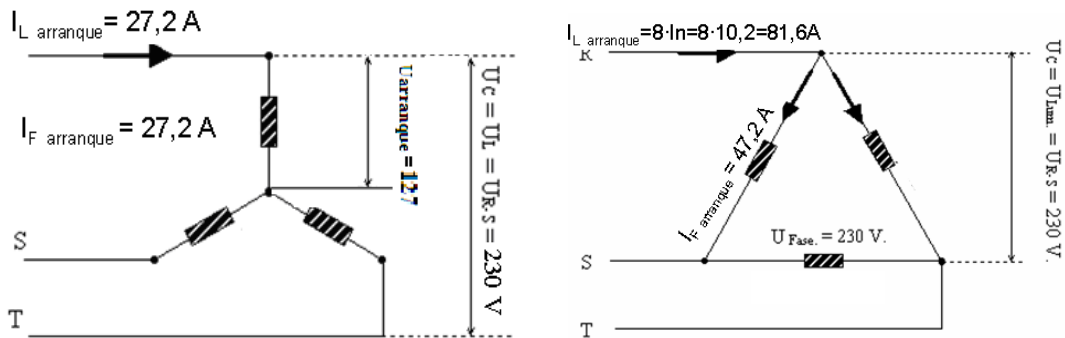


Figura 8. Estudio comparativo del valor de corriente de arranque

Para la contrastación de los valores calculados se utiliza de un ensayo en el cual se oscilografía la tensión aplicada a cada bobina (o grupo de bobinas correspondiente a una fase) y la corriente demandada de la red. En la figura 9 se aprecian dichos valores.



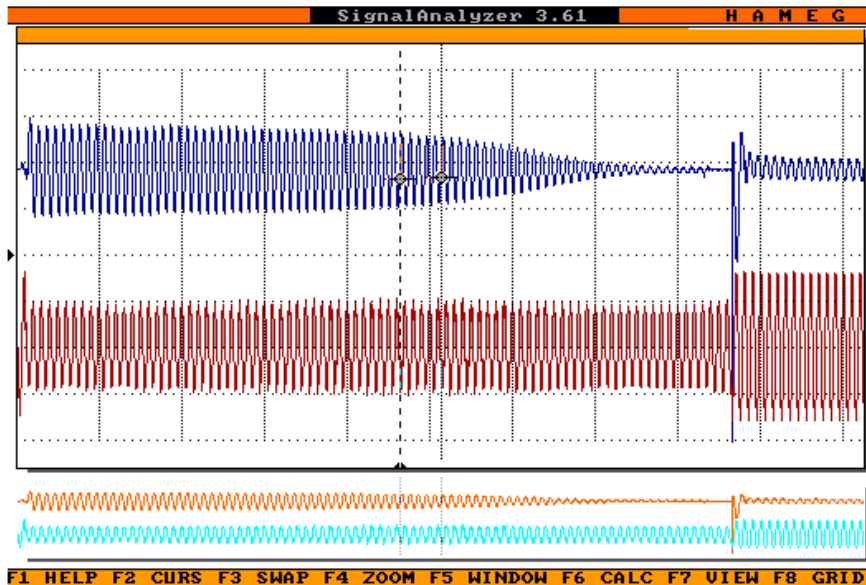


Figura 9. Gráfica de tensión y corriente en un arranque estrella triángulo

La gráfica superior se corresponde con la corriente demandada de la red durante el arranque en estrella. Una vez que el motor ha alcanzado la velocidad de régimen y disminuye sensiblemente la corriente, se aprecia el cambio de estrella a triángulo, en dicho cambio aparece un nuevo pico de corriente, cuyo valor puede ser muy grande, el valor de este pico de corriente depende de muchos parámetros entre otros de la inercia que posea la carga a la que se esté aplicando el ensayo. En todo caso la duración de este pico de corriente es de un semi-ciclo, es decir de alrededor de 10 milisegundos.

La grafica de la onda inferior es la correspondiente a la tensión de fase donde se puede observar que al arrancar en estrella la tensión aplicada a la bobina de una fase es bastante menor (un valor igual la raíz de tres), que es la nominal.

## 4.5 Automatismo convencional de arranque estrella triángulo

Una vez conocido con detalle el porqué del método de arranque estrella triángulo, solo quedaría ilustrar el modo usual de conseguir cambiar el sistema de conexión o configuración de las bobinas del motor. Como es fácil de entender el proceso de modificación de las placas metálicas de unión (apartado 4.2 y figuras 5 y 6) no es útil para este método de arranque porque esto implicaría una desconexión larga del motor de la red de alimentación para su cambio de ubicación, con lo que el motor se volvería a parar al proceder el cambio de estrella a triángulo.

En el entorno industrial se emplea los automatismos industriales a base de contactores, el funcionamiento de estos queda fuera del alcance de este trabajo, pero que el uso de estos aparatos permiten montar un circuito con 3 contactores que permitan el cambio de estrella a triángulo en un plazo de tiempo muy corto, durante el cual el motor no le da tiempo a descender su velocidad de forma apreciable. Los esquema de montaje son los de la figura 9.

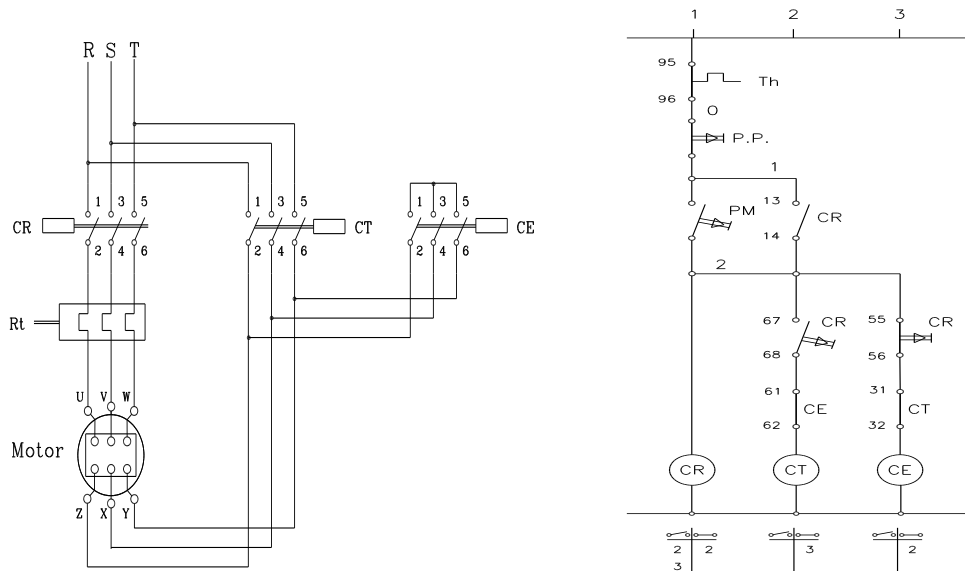


Figura 10. Esquemas de montaje de un arrancador estrella triángulo

Los esquemas representados en la figura 10, son los característicos de este tipo de arrancado. Se pueden diseñar de otras formas similares, pero por su simplicidad y su bajo coste económico suele ser el esquema más empleado en la industria. Los equipos representados y funcionamiento es ampliamente conocido por cualquier técnico, aún así se enumeran de forma sencilla:

Hay dos esquemas representativos el de la izquierda denominado de fuerza o potencia que representa el sistema trifásico de alimentación, donde se aprecian 3 contactores uno denominado "CR" (contactador de red, que siempre está activo cuando la maniobra esta activada), otro denominado "CE" (contactador de estrella, que permite cortocircuitar las tres bornas inferiores del motor, formado el denominado "puente de estrella"), y un tercer contactador denominado "CT" (contactador de triángulo, que permite transferir a los bornes inferiores del motor las tres fases formando la configuración en triángulo). Hay que remarcar que se conexionan inicialmente el "CR" y el "CE" y cuando el motor a alcanzado una determinada velocidad se desconecta el "CE" y se conecta el "CT". Nunca puedan estar a la vez conectados el "CE" y el "CT", porque se produciría un cortocircuito.

El circuito de la derecha es el denominado como esquema de maniobra o de control y es el encargado de alimentar a los contactores, accionados mediante unas pequeñas bobinas, que son representadas mediante sendos círculos, para producir el cambio de configuración de estrella a triángulo se hace necesario un temporizador, en este caso es neumático y acoplado al contactador CR.



## 5 Cierre

Podemos concluir remarcando varias cosas en este trabajo, que fundamentalmente tratan de concienciar a lector de su importancia y ayuda a la correlación entre los estudios teóricos de las configuraciones estrella triángulo y una de las fundamentales aplicaciones que realmente tienen en la industria.

Así, en los puntos iniciales del apartado 4 (puntos 4.1 y 4.2) se tratan de remarcar y analizar las consecuencias de las conexiones en configuración estrella o triángulo. Frecuentemente se utiliza ambos métodos de conexionado a la red, por ejemplo se instala en configuración estrella las luminarias dedicadas al alumbrado público, esto permite conectar receptores (bombillas) de 230 de tensión nominal a redes de distribución eléctrica de 400 voltios. Por otro lado existen infinidad de aplicaciones en motores industriales que se conectan en configuración triángulo, dado que como se acaba de demostrar, al efectuar un arranque estrella triángulo, su funcionamiento en régimen de trabajo es triángulo.

Este trabajo, a su vez, permite al alumno determinar los consumos de corriente que se pueden dar en cada caso, pudiendo evaluar cuando le interesa configurar en un modo u otro de funcionamiento para adaptarse a las características de las líneas de alimentación.

Mediante las diferentes figuras de montajes y conexionado también se pretende educar al alumno en los clásicos esquemas de maniobras y esquemas de potencia usuales en el entorno industrial, de manera que pueda ir familiarizándose con este tipo de documentación.

Al desarrollar este trabajo se ha tenido en cuenta la gran aportación que se realiza a los alumnos el explicar los conceptos mediante ejercicios prácticos y documentarlos mediante gráficas conseguidas de ensayos reales.

## 6 Bibliografía

### 6.1 Libros:

[1] Pérez Cruz, J., Pineda Sánchez, M., Puche Panadero, R. "Aplicaciones Técnicas Industriales de Motores de Inducción". UPV. 2010.

[2] Roger Folch, J., Riera Guasp, M., Roldán Porta, C. "Tecnología Eléctrica". Síntesis.2010.

[3] J.M. Merino Azcarraga. "Arranque Industrial de motores asíncronos", Mc Grau Hill. 1995.

[4] Pérez Cruz, J., Pineda Sánchez, M., Puche Panadero, R. "Introducción a las Instalaciones y Tecnología Eléctrica". UPV. 2009.

[5] Martínez Román, JA, Pérez Cruz, J., Pineda Sánchez, M. "Prácticas de Laboratorio de Máquinas Eléctricas". UPV. 2009.

[6] Roger Folch, J., Riera Guasp, M., Pineda Sánchez, M., Pérez Cruz, J. "Prácticas de Laboratorio de Tecnología Eléctrica". UPV. 2011.