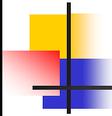


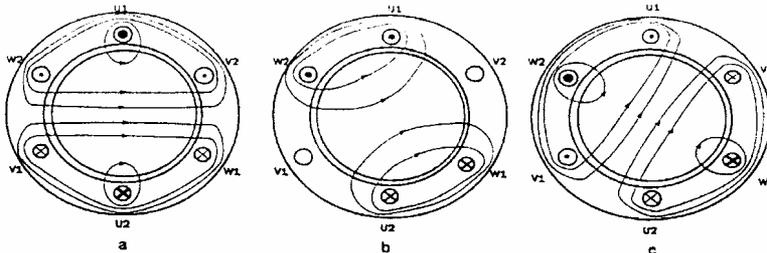
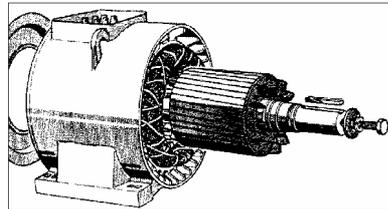
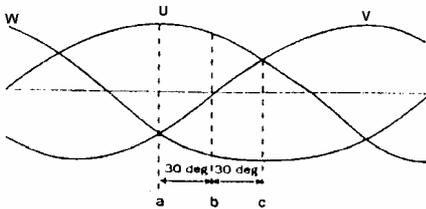


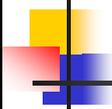
AUTOMATISMOS INDUSTRIALES

Tema 4 Arranque de motores trifásicos



Introducción (I)



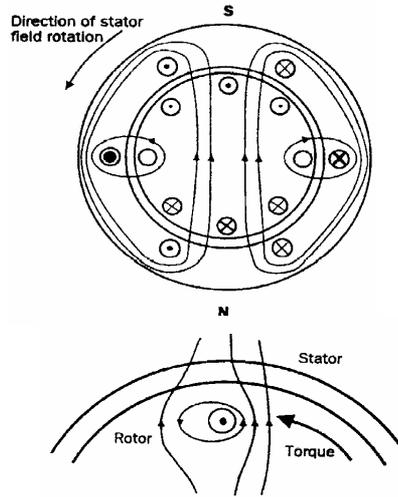


Introducción (II)

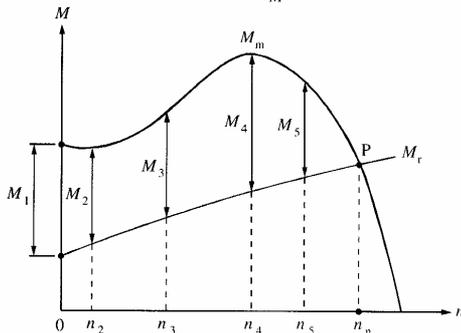
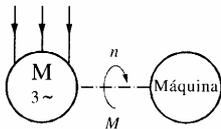
- En el motor de "jaula de ardilla", el giro motor se produce por la interacción entre el campo magnético del estator (giratorio) y el inducido en los bobinados de rotor (espiras en cortocircuito).
- Se conocen como motores asíncronos, ya que la velocidad de sincronismo no se alcanza nunca.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ r.p.m.}$$

- f: frecuencia de red
- p: nº de pares de polos

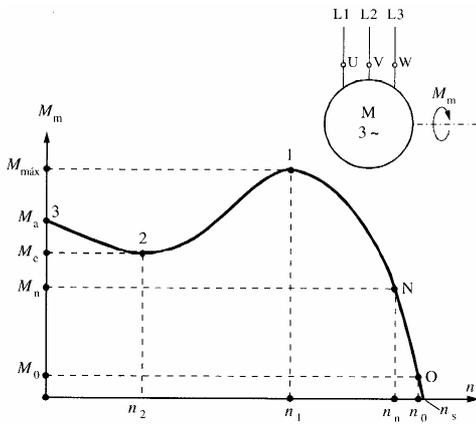


Par motor, resistente y motriz



- El par resistente aumenta con la velocidad.
- Cuando se igualan M_r y M_m la velocidad se mantiene constante.
 - Si $M_r > M_m \Rightarrow$ decelera
 - Si $M_r < M_m \Rightarrow$ acelera

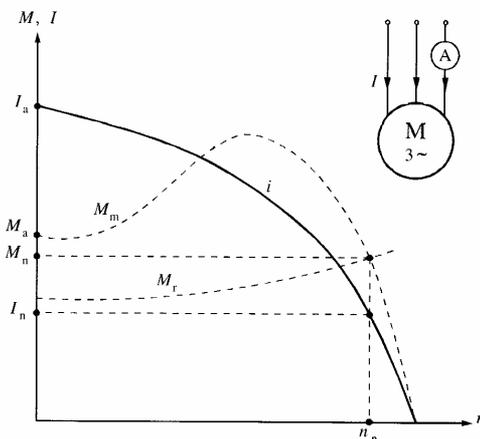
Par/velocidad de un motor trifásico



- 3 – Par de arranque
- 2 – Par de enganche
- 1 – Par máximo
- N – Par nominal
 - Para el que se diseña el motor
- O – Par en vacío
 - Vence la resistencia del propio motor
 - Potencia útil nula

- n_n – Velocidad nominal
- n_o – Velocidad de vacío
- n_s – Velocidad de sincronismo

Intensidad/velocidad



- La intensidad del motor es una característica del mismo.
- Se mide como la I de línea, independientemente de la conexión interna del motor.
 - Ej: 220/380V 52/30A

M_m – Par motor
 M_r – Par resistente

I_a – Intensidad de arranque
 I_n – Intensidad nominal

M_a – Par de arranque
 M_n – Par nominal

n_n – Velocidad nominal

Otros parámetros del motor

- Deslizamiento

$$S = n_s - n$$

- n_s : velocidad de sincronismo
- n : velocidad del motor

- Deslizamiento relativo

$$S_r = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100$$

- Potencia útil y rendimiento de un motor

$$P_{\text{absorbida}} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

- En vacío la potencia útil es nula

$$P_u(n_o) = 0$$

- Se define la potencia nominal P_n como la P_u a la velocidad nominal, consumiendo por tanto I_n .

$$P_u(n_n) = P_n$$

- El rendimiento de un motor (como característica) se define para su velocidad nominal.

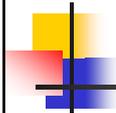
$$\eta = \frac{P_n}{P_{\text{absorbida}}} \quad \text{en cualquier otro caso} \quad \eta = \frac{P_u}{P_{\text{absorbida}}}$$

Tema 4, Arranque de motores trifásicos

Reglamento electrotécnico de baja tensión

- La instrucción MI BT 034 del REBT marca la máxima intensidad que un motor de C.A. puede absorber en el arranque.
 - Motores entre 0'75 y 1'5 Kw hasta $4'5 I_n$
 - Motores entre 1'5 y 5 Kw hasta $3 I_n$
 - Motores entre 5 y 15 Kw hasta $2 I_n$
 - Motores de más de 15 Kw hasta $1'5 I_n$
- Las compañías eléctricas pueden prescindir de estos límites siempre que no se perturbe la línea.
- El método de arranque de un motor dependerá por tanto de:
 - La I_a/I_n
 - Las características de la red (sobredimensionado, transformadores, etc).
 - La reglamentación de las compañías

Tema 4, Arranque de motores trifásicos

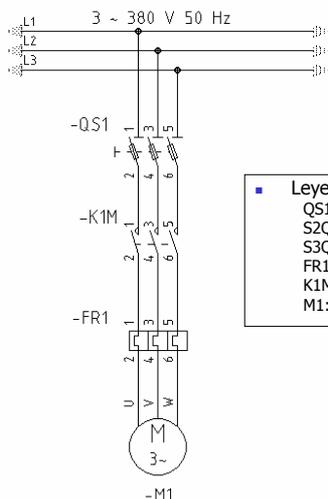


Arranque directo

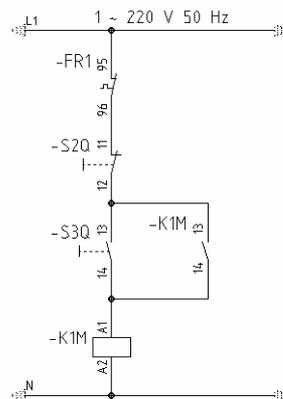
- Se realiza en un solo tiempo
 - El estator se acopla directamente al red
 - La corriente inicial es de 4 a 8 veces la nominal. Se considera para cálculos $I_a=6.I_n$
 - Solo se utiliza con motores de pequeña y mediana potencia y si la red lo permite.
 - El par de arranque $M_a \approx 1'5 M_n$
 - El par máximo se alcanza aproximadamente al 80 % de la velocidad nominal.
 - No se recomienda en montacargas ni en cintas transportadoras por el par de arranque.
 - El motor solo necesita tres bornes U – V – W. La conexión interna dependerá de la tensión de la línea.
 - Para el giro a derechas se conectan:
 - L1 - U
 - L2 - V
 - L3 - W
- Para el cambio de giro, se intercambian dos.

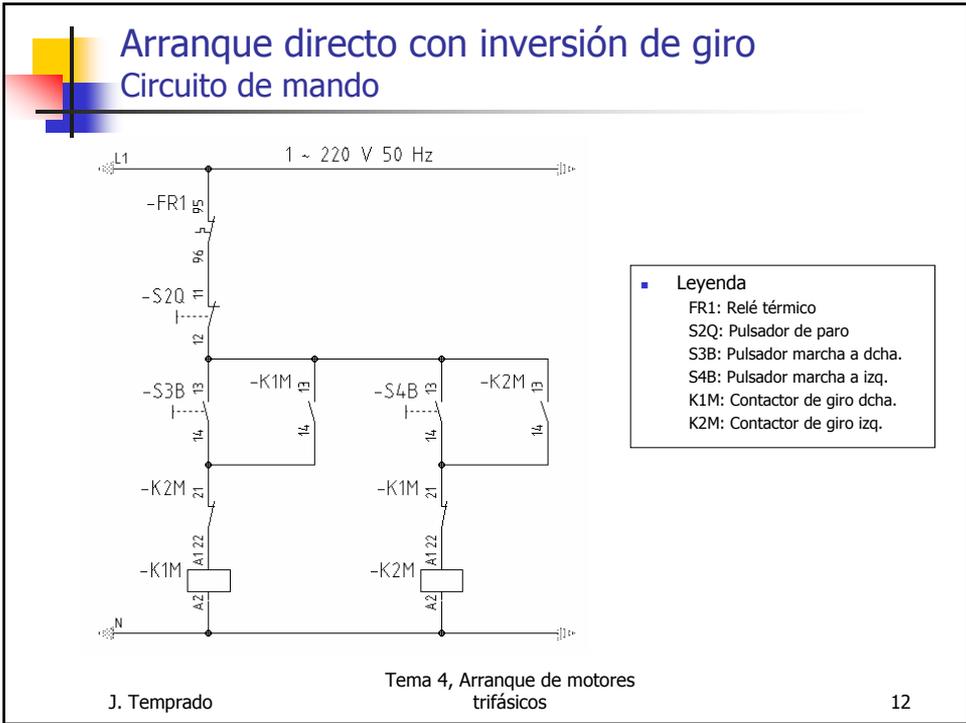
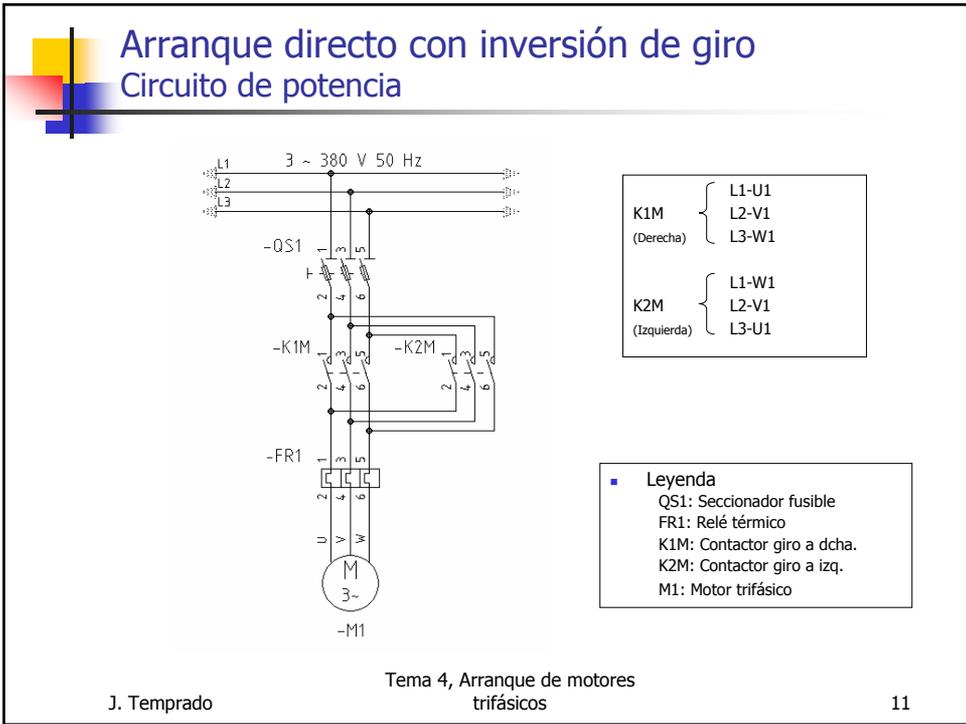


Arranque directo



- Leyenda
- QS1: Seccionador fusible
- S2Q: Pulsador de paro
- S3Q: Pulsador de marcha
- FR1: Relé térmico
- K1M: Contactor principal
- M1: Motor trifásico

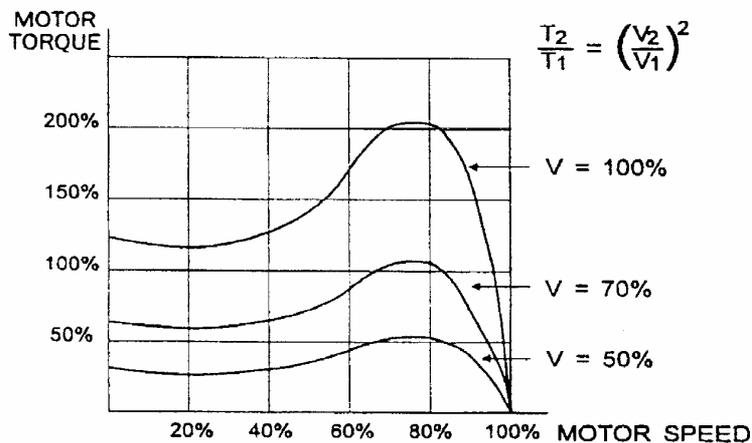


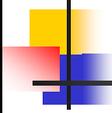


Tipos de arranque a tensión reducida

- Estrella – triángulo
 - El motor se arranca en dos fases reduciendo la tensión de los bobinados
 - La corriente de arranque se reduce a 2 veces I_n
- Estrella – Triángulo/Resistencias – Triángulo
 - Añade al arranque estrella-triángulo un paso intermedio haciendo una conexión en triángulo, con una resistencia en serie con los bobinados de cada fase.
- Mediante autotransformador
 - El motor arranca en dos o más etapas o de manera continua a través de un autotransformador.
- Mediante resistencias estáticas
 - Similar al arranque con autotransformador, el motor se conecta en dos o más etapas conectando una resistencia en serie con cada bobinado del estator.
- Mediante resistencias rotóricas
 - Requiere un motor de rotor bobinado (más caro)
 - Intercalando resistencias con el rotor, se puede desplazar el par máximo a velocidades bajas.
- Arranadores estáticos (electrónicos)
 - La tensión aplicada al motor se controla variando el ángulo de disparo de unos SCR conectados en serie con cada bobinado del estator

Efecto del arranque a tensión reducida



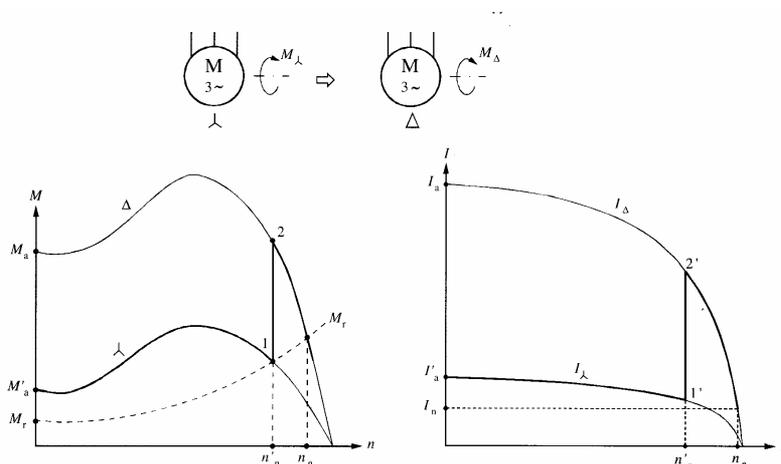


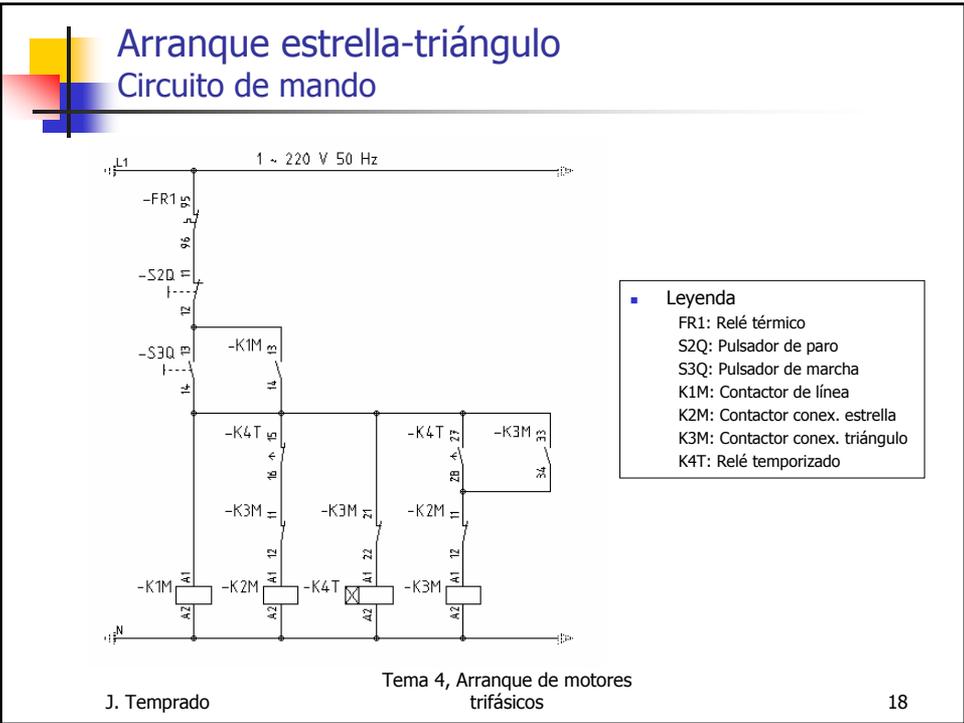
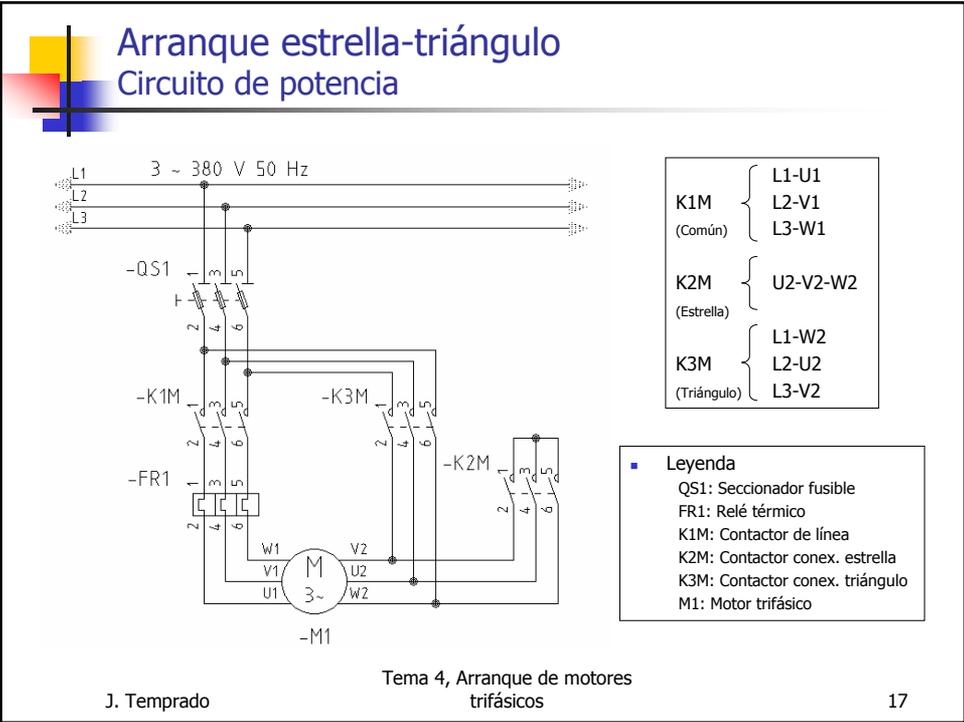
Arranque Estrella – triángulo

- Es necesario disponer de un motor con los 6 bornes (2 por bobina)
- El motor arranca en estrella
 - La tensión de los bobinados se reduce en al 57%
 - El par se reduce al 33%
 - La corriente de arranque se reduce a 2 veces I_n
- Al alcanzar la máxima velocidad, el motor se desconecta momentáneamente y a continuación se conecta en triángulo para alcanzar la velocidad de régimen
 - Durante la desconexión de puede producir una pequeña pérdida de par y un pico de corriente
- Es el arranque más utilizado por su sencillez, precio y prestaciones.

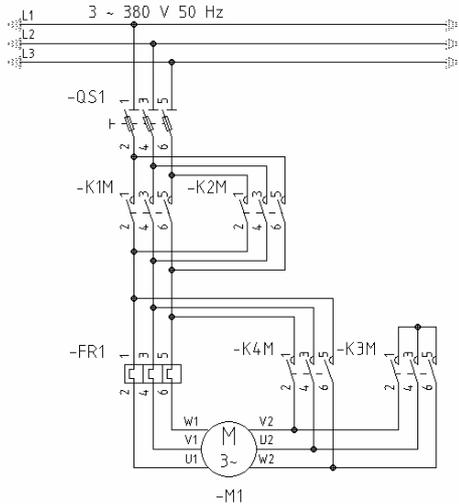


Variación M/n e I/n en el arranque $\star-\triangle$





Arranque estrella-triángulo con inversión de giro Circuito de potencia (versión simplificada)



| | |
|--------------------|----------|
| K1M (Derecha) | L1-U1 |
| | L2-V1 |
| | L3-W1 |
| K2M (Izquierda) | L1-W1 |
| | L2-V1 |
| | L3-U1 |
| K3M (Estrella) | U2-V2-W2 |
| | U1-W2 |
| K4M (Triángulo) | V1-U2 |
| | W1-V2 |

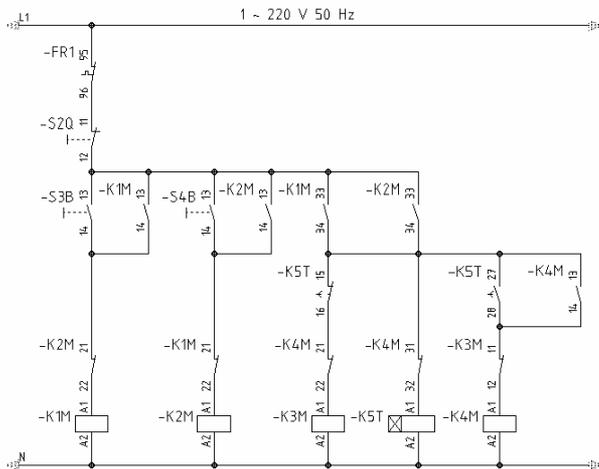
- Leyenda**
- QS1: Seccionador fusible
 - FR1: Relé térmico
 - K1M: Contactor de línea dcha.
 - K2M: Contactor de línea izq.
 - K3M: Contactor conexión estrella
 - K4M: Contactor conexión triángulo
 - M1: Motor trifásico

Tema 4, Arranque de motores trifásicos

J. Temprado

19

Arranque estrella-triángulo con inversión de giro Circuito de mando

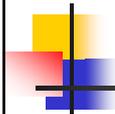


- Leyenda**
- FR1: Relé térmico
 - S2Q: Pulsador de paro
 - S3B: Pulsador marcha a dcha.
 - S4B: Pulsador marcha a izq.
 - K1M: Contactor de línea dcha.
 - K2M: Contactor de línea izq.
 - K3M: Contactor conex. estrella
 - K4M: Contactor conex. triángulo
 - K5T: Relé temporizado

Tema 4, Arranque de motores trifásicos

J. Temprado

20

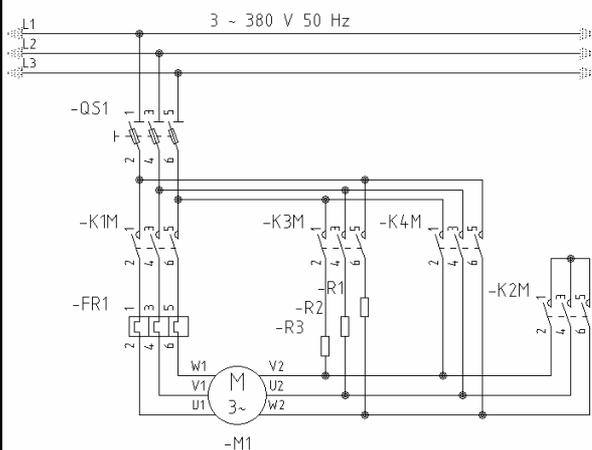


Arranque Estrella – Triángulo/Resistencias – Triángulo

- Similar al arranque estrella-triángulo, añade un paso intermedio haciendo una conexión en triángulo, con una resistencia en serie con el bobinado de cada fase.
- Minimiza los transitorios en el paso de estrella a triángulo
- Se pueden realizar diversas variantes dependiendo del circuito de mando
 - Con y sin corte de alimentación entre pasos
 - Con y sin temporización entre ΔR y Δ



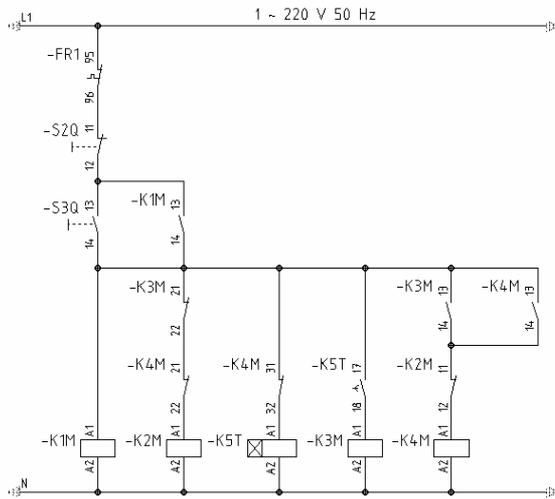
Arranque estrella-R/triángulo-triángulo Circuito de potencia



| | | |
|---------------------|---|----------|
| K1M (Línea) | { | L1-U1 |
| | | L2-V1 |
| | | L3-W1 |
| K2M (Estrella) | { | U2-V2-W2 |
| | | |
| K3M (Resistenc.) | { | L1-R1 |
| | | L2-R2 |
| | | L3-R3 |
| K4M (Triángulo) | { | L1-W2 |
| | | L2-U2 |
| | | L3-V2 |
| | | |

- **Leyenda**
 - QS1: Seccionador fusible
 - FR1: Relé térmico
 - K1M: Contactor de línea
 - K2M: Contactor conexión estrella
 - K3M: Contactor resistencias
 - K4M: Contactor conexión triángulo
 - M1: Motor trifásico

Arranque estrella-R/triángulo-triángulo Circuito de mando



- Leyenda
 - FR1: Relé térmico
 - S2Q: Pulsador de paro
 - S3Q: Pulsador marcha
 - K1M: Contactor de línea
 - K2M: Contactor conexión estrella
 - K3M: Contactor resistencias
 - K4M: Contactor conexión triángulo
 - K5T: Relé temporizado

J. Temprado

Tema 4, Arranque de motores
trifásicos

23

Arranque mediante resistencias estáticas

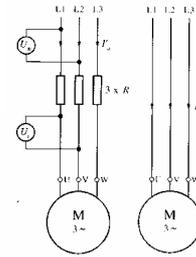
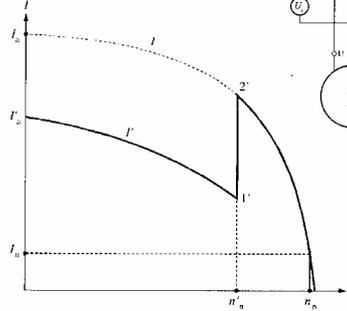
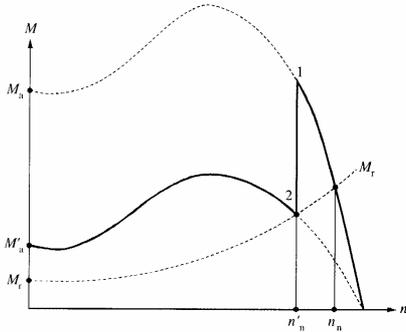
- Colocando resistencias en serie con el estator, se puede elegir la tensión de arranque y por tanto la intensidad de arranque.
- El motor arranca en dos o más etapas, conectando una resistencia en serie con cada bobina del estator.
 - El valor de la resistencia se reduce en cada etapa
 - Cada etapa necesita un contactor enclavado y una temporización
- Ventajas
 - Arranque configurable. Se puede elegir la I_a
 - Arranque suave. La velocidad aumenta a tramos
 - La alimentación es continua. No hay cortes
- Inconvenientes
 - Es caro
 - Un método económico es utilizar resistencias líquidas (cubos de carbonato de sodio)
 - El par de arranque es pequeño
 - Es un método ineficaz y con gran pérdida calórica

J. Temprado

Tema 4, Arranque de motores
trifásicos

24

A. mediante resistencias estáticas (I)

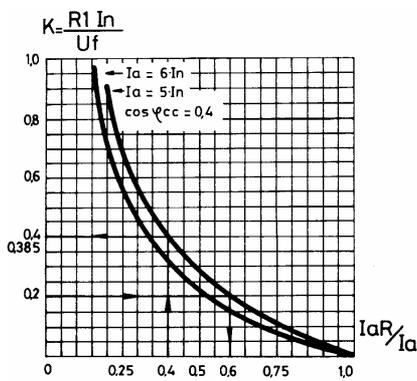


Tema 4, Arranque de motores trifásicos

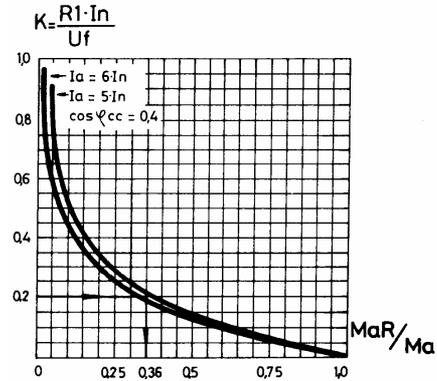
J. Temprado

25

A. mediante resistencias estáticas (II)



- Ia Intensidad de arranque en directo
- IaR Intensidad de arranque con resistencias
- In Intensidad nominal
- K Factor
- R1 Resistencia de arranque por fase
- Uf Tensión de fase
- cos φ_{cc} Factor de potencia en cortocircuito

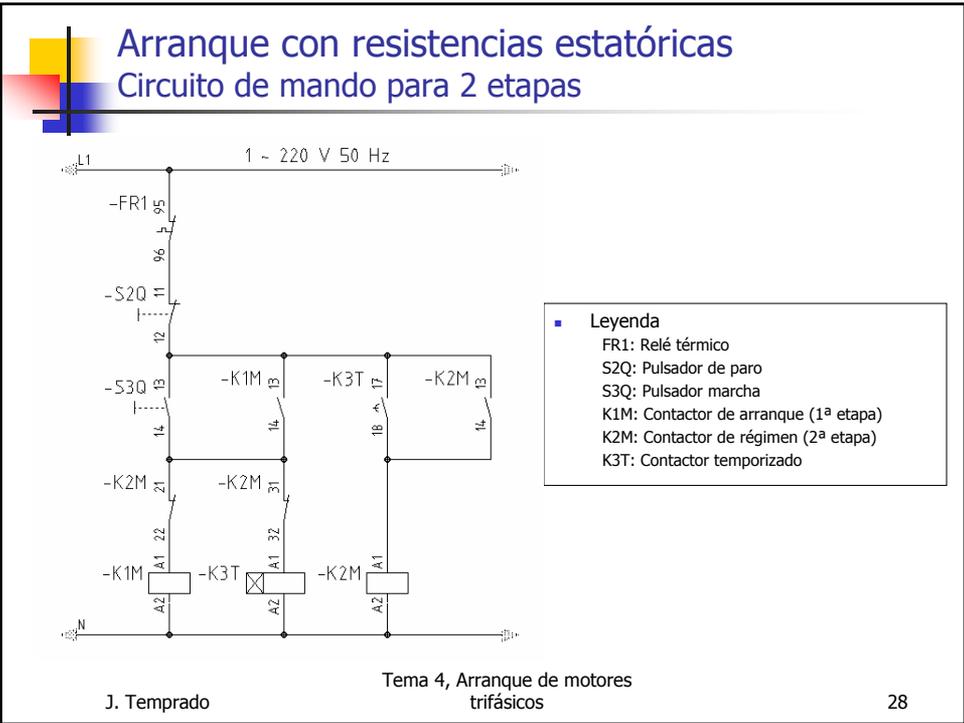
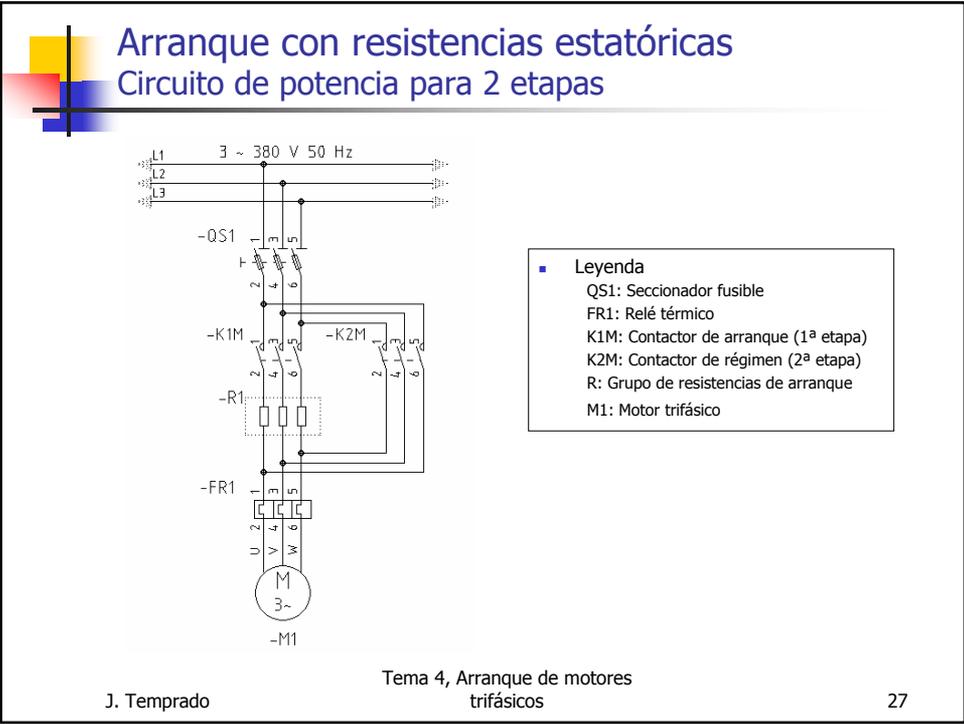


- Ia Intensidad de arranque en directo
- In Intensidad nominal
- K Factor
- Ma Momento de arranque en directo
- MaR Momento de arranque con resistencias
- R1 Resistencia de arranque por fase
- Uf Tensión de fase
- cos φ_{cc} Factor de potencia en cortocircuito

Tema 4, Arranque de motores trifásicos

J. Temprado

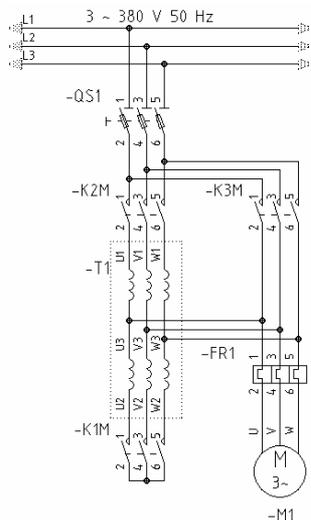
26



Arranque mediante autotransformador

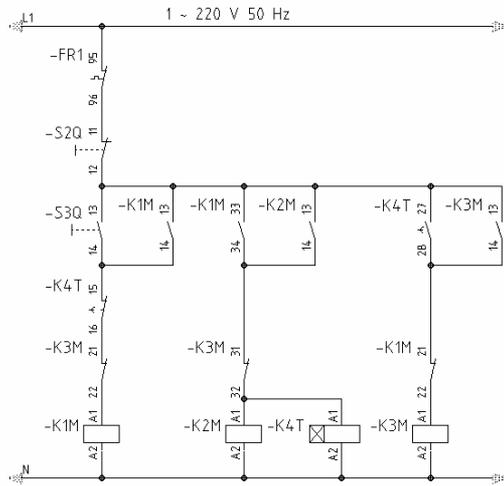
- Se intercala un autotransformador en la línea. Variando la relación de transformación podemos elegir la corriente o el par de arranque necesario
- El motor arranca en dos o más etapas, incluso de manera continua, utilizando un autotransformador variable
- Cada etapa necesita un contactor enclavado y una temporización
- Ventajas
 - Arranque suave y configurable
 - La alimentación puede ser continua o no
 - El par de arranque no queda muy penalizado
- Inconvenientes
 - Es caro. El autotransformador se fabrica bajo pedido

Arranque mediante autotransformador Circuito de potencia para 2 etapas



- Leyenda
 - QS1: Seccionador fusible
 - FR1: Relé térmico
 - K1M: Contactor estrella TRF (1ª etapa)
 - K2M: Contactor de arranque (1ª etapa)
 - K3M: Contactor de régimen (2ª etapa)
 - T1: Autotransformador trifásico
 - M1: Motor trifásico

Arranque mediante autotransformador Circuito de mando para 2 etapas. Conmutación cerrada



■ Leyenda

- FR1: Relé térmico
- S2Q: Pulsador de paro
- S3Q: Pulsador marcha
- K1M: Contactor estrella TRF (1ª etapa)
- K2M: Contactor de arranque (1ª etapa)
- K3M: Contactor de régimen (2ª etapa)
- K4T: Contactor temporizado

Tema 4, Arranque de motores trifásicos

J. Temprado

31

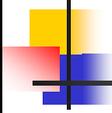
Arranque mediante resistencias rotóricas

- En el motor de jaula de ardilla, el par máximo se alcanza aproximadamente al 80% de la velocidad nominal (n_n)
- En un motor de rotor bobinado se puede desplazar el par máximo a velocidades bajas, intercalando resistencias en serie con el rotor.
- Utilizando varios grupos de resistencias, se puede conseguir un arranque suave con un par elevado durante todo el periodo de arranque.
- La intensidad, y por tanto el consumo, se mantiene moderada durante el periodo de arranque.
- El motor de rotor bobinado es más caro. Se utiliza cuando hace falta arrancar suavemente con una carga elevada.

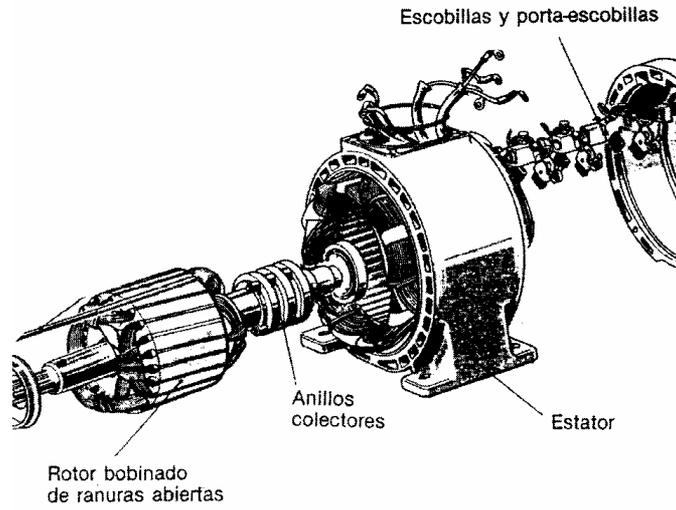
Tema 4, Arranque de motores trifásicos

J. Temprado

32



Motor de anillos rozantes



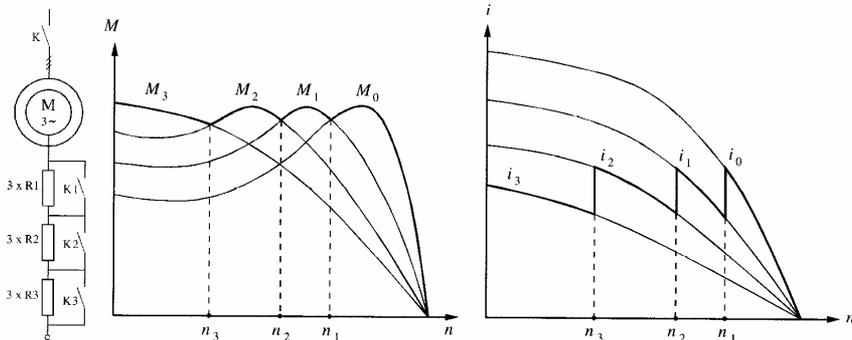
J. Temprado

Tema 4, Arranque de motores trifásicos

33



Arranque mediante resistencias rotóricas

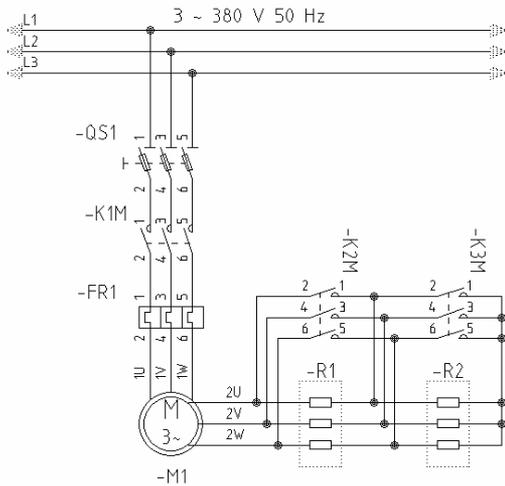


J. Temprado

Tema 4, Arranque de motores trifásicos

34

Arranque mediante resistencias rotóricas Circuito de potencia para 3 etapas



■ Leyenda

- QS1: Seccionador fusible
- FR1: Relé térmico
- K1M: Contactor estator
- K2M: Contactor 2ª etapa
- K3M: Contactor 3ª etapa (régimen)
- R1: Grupo resistencias 1ª etapa
- R2: Grupo resistencias 2ª etapa
- M1: Motor trifásico

Tema 4, Arranque de motores trifásicos

J. Temprado

35

Arrancadores estáticos (electrónicos)

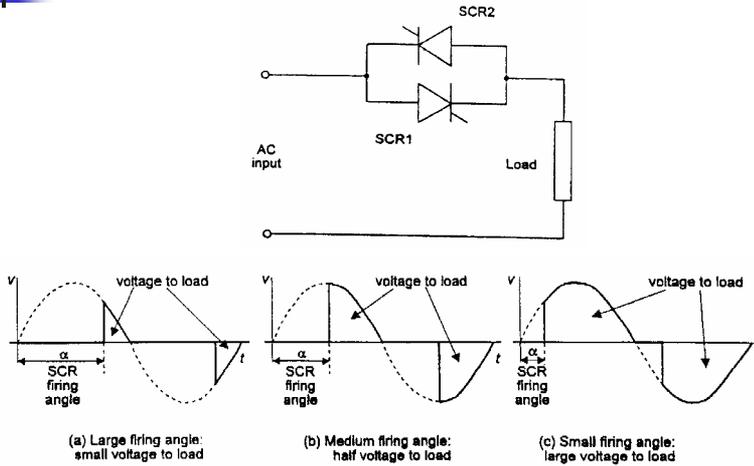
- Son dispositivos semiconductores que se intercalan entre la red y el motor.
- Utiliza pares de SCR (tiristores) montados en antiparalelo en serie con cada una de las fases del motor.
- La tensión aplicada al motor se controla variando el ángulo de disparo de los SCR (control de fase).
- Durante el arranque el motor se alimenta con una tensión reducida no senoidal.
 - Se mantiene constante la intensidad en 2 ó 3 veces la nominal
 - Se mantiene el par un poco por encima del par resistente

Tema 4, Arranque de motores trifásicos

J. Temprado

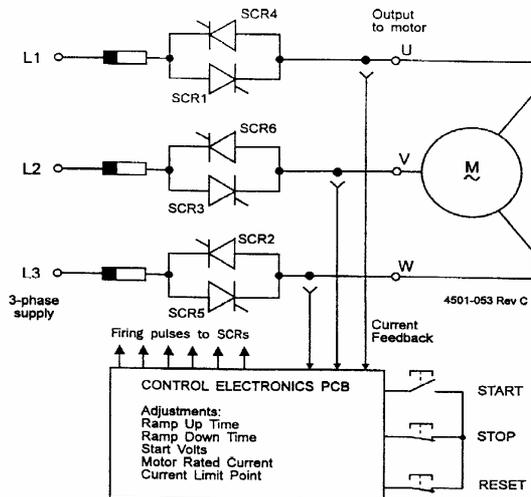
36

Principios del control de fase



Tema 4, Arranque de motores trifásicos

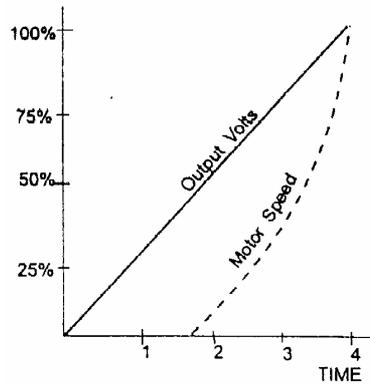
Arrancador estático por control de fase



Tema 4, Arranque de motores trifásicos

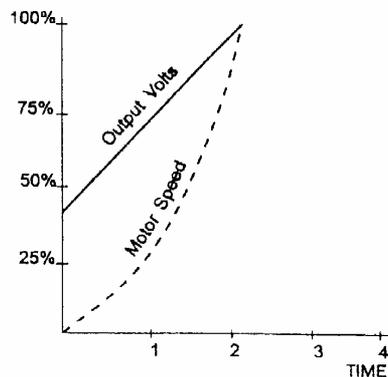
Arranque por rampa de tensión (I)

- El arranque por rampa de tensión es un método de arranque que aplica al motor un incremento de tensión constante.
- En el ejemplo, la tensión de salida del arrancador varía de 0 a 100% en cuatro segundos.
 - Existe un retraso entre el inicio de la rampa de arranque y el giro del motor.
 - El tiempo de la rampa es ajustable por el usuario.



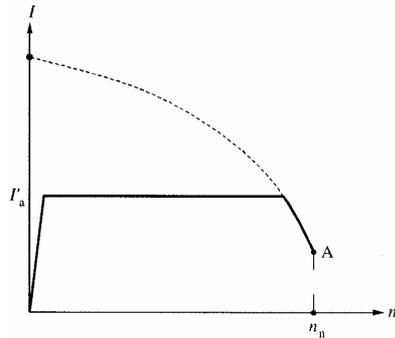
Arranque por rampa de tensión (II)

- Normalmente se aplica un nivel de tensión de Arranque, ajustado por el usuario. Esto asegura que el motor empiece a girar inmediatamente y sin "agarre".
 - La rampa se inicia con un nivel preseleccionado y a partir de ahí, aumenta con un incremento constante.
 - En el ejemplo, el nivel "start volt" se ha situado en el 40% de la tensión nominal.



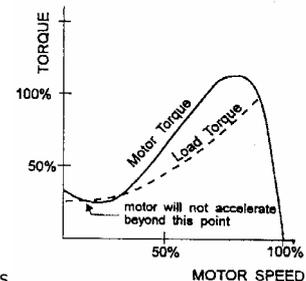
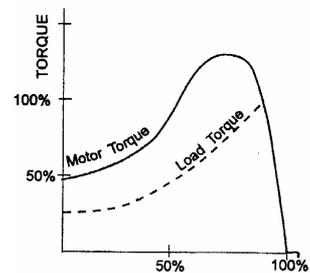
Arranque con límite de corriente (I)

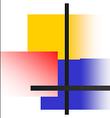
- El Arranque con Límite de Corriente es un método de arranque que sólo está disponible en los Arranadores de Tensión Reducida con monitoreo de corriente de salida (microprocesador con mayor capacidad de cálculo).
 - La máxima corriente de arranque requerida es preseleccionada por el usuario.
 - En el arranque, la tensión de salida aumentará con el valor de rampa seleccionado hasta que la corriente del motor alcance el nivel máximo.
 - La rampa de tensión de salida es automáticamente ajustada para mantener la corriente de arranque a este nivel o por debajo de él.



Arranque con límite de corriente (II)

- En la primera figura se ha ajustado un límite de corriente del 400%.
 - La carga se acelera hasta la velocidad nominal de forma correcta.
- En la segunda figura, el límite de corriente se ha ajustado al 200% de la I_n .
 - En un punto del ciclo de arranque, el par requerido por la carga (resistente) excede el par disponible en el motor.
 - El motor entrará en un "atascamiento" y no acelerará más allá de este punto, hasta que la tensión de salida aumente lo suficiente.
 - El motor continuará absorbiendo el doble de la corriente nominal.
 - El motor se sobrecalentará muy rápidamente, ya que tendrá un enfriamiento reducido por su velocidad reducida.





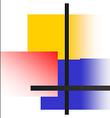
Ajustes estándar (I)

- **LÍMITE DE CORRIENTE (Current Limit)**
 - Permite el ajuste de la máxima corriente de arranque del motor.
 - Si se selecciona un valor muy bajo, el motor no tendrá fuerza en el arranque. El valor mínimo depende de las características de arranque del motor y de la carga. Puede requerirse de algo de experiencia para encontrar el valor óptimo.
 - Un valor bajo puede conducir a arranques erráticos cuando varía la carga.
 - Si no es necesario limitar la corriente de arranque, se debe dejar al máximo.
- **TENSIÓN DE ARRANQUE (Start volts)**
 - Este ajuste permite el control sobre el par de arranque inicial del motor.
 - Con él se consigue dar una característica de arranque adecuada, sin ningún retraso significativo desde el instante de arranque requerido hasta que el motor empieza a rotar.



Ajustes estándar (II)

- **TIEMPO DE ACELERACION (Ramp Up Time)**
 - Controla el incremento del nivel de la tensión del motor. Este valor dice como de rápido el motor llegará a la velocidad nominal.
 - La función de limite de corriente puede anular el ajuste de 'TIEMPO DE ACELERACION'. Si el arranque se va a controlar totalmente mediante el limite la corriente, el 'TIEMPO DE ACELERACION' debería ser ajustado al más rápido.
 - Normalmente se ajusta en función de la carga.
 - Carga liviana:
 - Una rápida aceleración provocará el mínimo retardo en alcanzar la velocidad pero también una alta corriente de arranque.
 - Una aceleración lenta puede usarse para reducir la corriente de arranque.
 - Carga pesada:
 - La aceleración debe elegirse de manera que logre un arranque suave.
 - El óptimo ajuste es normalmente el más rápido posible de manera que el motor no sufra excesivo calentamiento.



Ajustes estándar (III)

- TIEMPO DE DESACELERACION (Ramp Down Time)
 - Controla la velocidad con la que se va reduciendo la tensión durante la parada.
 - Este valor debe ser ajustado a un nivel donde el motor para suavemente sin vibración o shock en la carga.
 - Normalmente se usan desaceleraciones rápidas, aunque a veces es necesario hacerlo suavemente.
 - Ejemplo: En el bombeo de líquidos, al detener el motor rápidamente puede producirse "el golpe de ariete".
 - El arrancador suave no puede parar al motor de manera más rápida de lo que tardaría en parar al cortar la alimentación (no incorpora ningún tipo de frenado).



Utilización de los arrancadores estáticos

- Algunos ejemplos de utilización de los arrancadores suaves:
 - Limitación de la máxima corriente de arranque, por ejemplo, cuando la capacidad de la red inadecuada.
 - En el arranque y parada de sistemas de transporte o arrastre, donde es necesario que las maniobras se realicen de forma suave. (ascensores, teleféricos, cintas transportadoras, etc.)
 - Arranque de cargas altamente inerciales que son cargadas sólo cuando alcanzan velocidad total (ventiladores, hojas de sierra, etc.)
 - Aplicaciones de bombeo donde tanto el arranque como sobre todo la parada (para evitar "el golpe de ariete") deben ser realizadas suavemente.

Resumen de los sistemas de arranque

| | Corriente de arranque | Par de arranque | Ventajas | Inconvenientes | Duración media del arranque | Uso habitual |
|--|--|---------------------|---|---|-----------------------------|--|
| Arranque directo | de 4 In a 8 In | de 0,6 Mn a 1,5 Mn | - Arranque por simple conexión a la red - Par de arranque normal | - Elevada intensidad de arranque - No permite un arranque progresivo | 2-3 segundos | Máquinas pequeñas que arrancan en carga |
| Arranque estrella-triángulo | de 1,3 In a 2,6 In | de 0,2 Mn a 0,5 Mn | - Arrancador barato (3 contactores) - Buena relación par/intensidad | - Par de arranque pequeño - Algunos fenómenos transitorios en el paso de estrella a triángulo - La tensión de red ha de coincidir con la tensión nominal de los devanados | de 3 a 8 segundos | Máquinas que arrancan en vacío. Máquinas centrifugas de pequeña potencia |
| Arranque por autotransformador | de 1,7 In a 4 In | de 0,4 Mn a 0,85 Mn | - Buena relación par/intensidad | - Necesita un autotransformador, que es un equipo caro | de 7 a 12 segundos | Máquinas potentes o de mucha inercia, en las que es importante reducir la punta de intensidad |
| Arranque por resistencias estáticas | de 4 h a 5 In | de 0,3 Mn a 0,95 Mn | - Posibilidad de escoger las etapas de aceleración - No hay fenómenos transitorios en las diversas etapas | - La reducción de la intensidad de arranque es pequeña - Necesita resistencias externas | de 7 a 12 segundos | Máquinas de alta inercia, en donde no importa excesivamente la punta de intensidad |
| Arranque por resistencias rotóricas | menor que 2,5 In | menor que 2,5 Mn | - Muy buena relación par/intensidad - Posibilidad de escoger las etapas de aceleración - No hay transitorios en las diversas etapas | - Se precisa un motor de rotor bobinado, que es más caro que uno de jaula, para igual potencia - Necesita resistencias externas | | Máquinas de arranque en carga o progresivo. Máquinas que requieran cierta regulación de la velocidad |
| Arranque estático | constante en toda la aceleración . Se fija su valor entre 2 In y 3 In. | de 0,25 Mn a 0,4 Mn | - Se reduce la corriente de arranque a un valor prefijado, que se mantiene constante en la aceleración | - Pequeño par de arranque - El equipo de alimentación es caro | Ajustable | Máquinas que arranquen en vacío o a poca carga. Cuando se requiera un arranque y/o parada suave. |

Tema 4, Arranque de motores trifásicos