

## ARRANQUE DE MOTORES ASÍNCRONO TRIFÁSICOS

Los dos principales problemas que trae aparejado el arranque son:

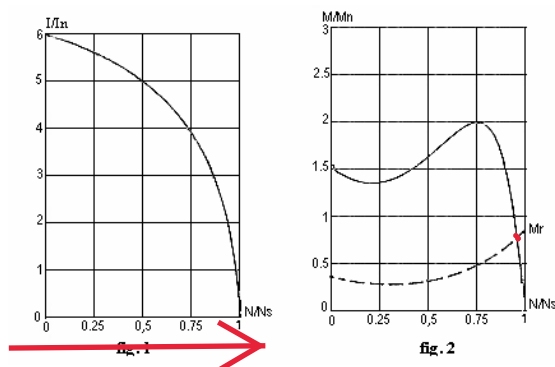
- 1) necesidad de disponer de un *par de arranque elevado*
- 2) conseguir *corrientes de arranque no muy grandes*, compatibles con la red.

**Procedimientos de arranque.** Estudiaremos los siguientes casos:

- 1) arranque directo
- 2) motor con arrollamientos divididos
- 3) por conmutación estrella-triángulo
- 4) estático por resistencia
- 5) por auto-transformador
- 6) con anillos rozantes
- 7) electrónico por tensión variable y limitación de corriente
- 8) jaulas especiales

### 1) Arranque directo

En el instante de arranque, rotor bloqueado, máquina en cortocircuito,  $I_a$  grandes y  $M_a$  bajos. Apto para potencias reducidas por requerimientos de la red. No recomendado si el arranque debe hacerse lenta y progresivamente (montacargas, cintas transportadoras, etc.) fig. 1y 2



- \* Corriente de arranque  
4 a 8 la veces la corriente nominal
- \* Par de arranque  
0,5 a 1,5 veces el par nominal
- \* Características
  - Motor 3 bornes pequeña y media potencia
  - Arranque en carga.
  - Punta de corriente y caída de tensión elevadas
- \* Sin ajuste de parámetros
- Equipamiento sencillo

### 2) Motor con arrollamientos divididos

Lleva un arrollamiento estático desdoblados en dos en paralelo. Es equivalente a dos semimotores de igual potencias. Se arranca con el primer semimotor directo, esto hace que la  $I_a$  y  $M_a$  sean la mitad pero con un  $M_a$  superior que en el arranque  $Y\Delta$ . Al finalizar el arranque se conecta la otra mitad. lo que hace que la punta de corriente sea débil y de corta duración puesto que no se ha interrumpido la conexión fig. 3 y 4.

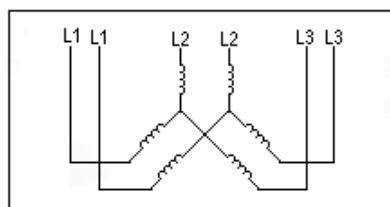


fig. 3

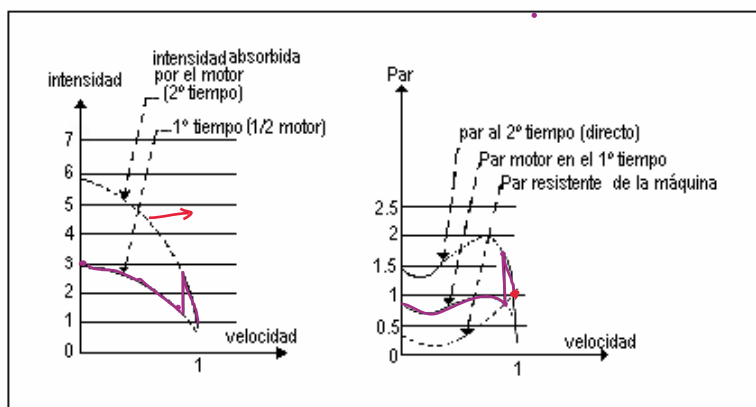


fig. 4 Arranque de los motores de arrollamiento partidos

### 3) Por conmutación estrella-triángulo

El motor arranca en Y y después de cierto tiempo se pasa a  $\Delta$ .

Se opera una reducción de  $I_a$  por disminución de  $U$ , pero así también se reduce  $M_a$ .

La  $I_a$  disminuye en la relación  $\frac{I_{LY}}{I_{L\Delta}} = \frac{U_L / \sqrt{3} Z_F}{U_L \cdot \sqrt{3} / Z_F} = 1/3$  -fig. 5-

y  $M_a$  en la relación:  $M_Y \equiv U_F^2 = U_L^2 / 3$ ;  $M_{\Delta} \equiv U_F^2 = U_L^2 \therefore M_Y / M_{\Delta} = 1/3$  -fig. 6-

Es indicado para aquellas máquinas con arranque en vacío o que tengan un  $M_a$  resistente pequeño.

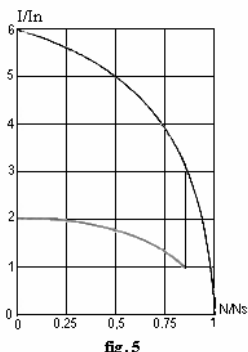


fig. 5

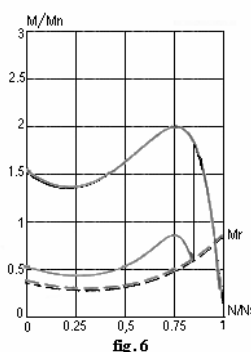


fig. 6

\* **Corriente de arranque**

1,8 a 2,6 veces la corriente nominal

\* **Par de arranque**

0,5 veces el par nominal

\* **Características**

- **Motor 6 bornes**

- Arranque en vacío o a débil par resistente

- Puntas de corriente y de par elevadas en el paso

"estrella-triángulo"

- Aparellaje con mantenimiento

\* **Sin ajuste de parámetros**

### Esquema de conexiones

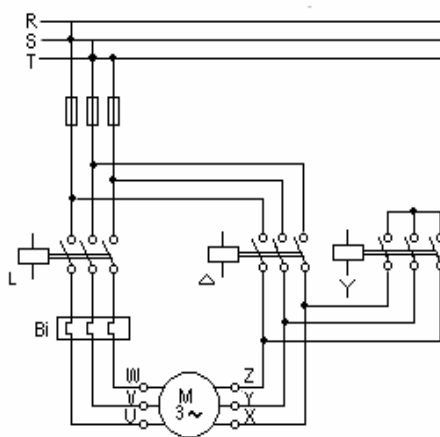


fig. 7

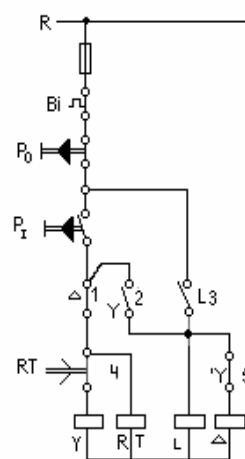


fig. 8

fig. 7 Arranque automático en estrella-triángulo de un motor por medio de contactores y relees de tiempo; accionamiento mediante pulsadores

Protección de sobrecarga por **relees bimatéticos**, protección contra cortocircuito por **fusibles**

Protección contra tensión decreciente por conexión de **autorretención de los contactores**

### Procedimiento

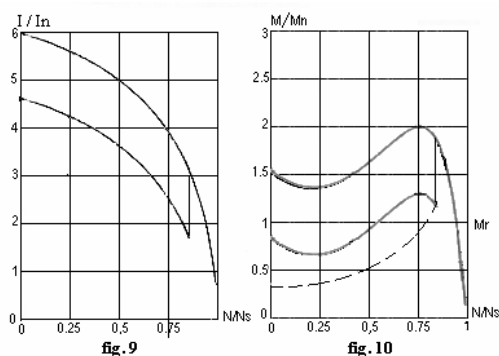
Al accionar el pulsador PI, cierra el contactor de línea L y el contactor de estrella Y y se pone en marcha el relee de tiempo RT. fig. 8-

Transcurrido el tiempo prefijado, RT desconecta el contactor Y y conecta el  $\Delta$ .-

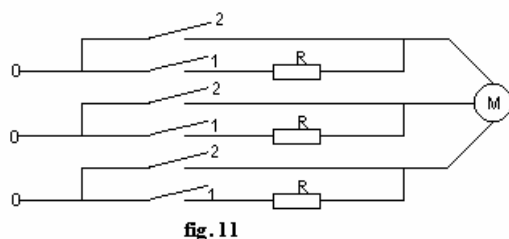
En el comercio se encuentran motores para 220/380 V. y para 300/660 V. ó 380 V.  $\Delta$ ; esto significa que las fases del primero han sido calculadas para 220 V. y para 380V.el segundo, por consiguiente solamente estos últimos admiten arranque estrella-triángulo en línea trifásica de 380 V.

### 4) Estático por resistencias

Arranca a tensión reducida al conectar en serie con cada fase una resistencia que luego es eliminada. El  $M_a$  es relativamente pequeño para una punta de corriente todavía importante. La tensión a los bornes no es constante durante la aceleración, la corriente disminuye a medida que el motor acelera y por ende aumenta la tensión. Los valores de  $M$  son más elevados que los sistemas que suministran una tensión reducida a valores fijos. La velocidad aumenta progresivamente sin cambios bruscos.- Este método es conveniente para máquinas con par resistente creciente y de gran inercia. La resistencia, no inductiva, reduce la amplitud de la punta de corriente, durante el transitorio de puesta en tensión.



Esquema de conexiones, Fig. 11:



- \* **Corriente de arranque**  
4,5 veces la corriente nominal –fig.9-
- \* **Par de arranque**  
0,5 a 0,75 veces el par nominal –fig.10-
- \* **Características.**
  - Motor 3 Bornes, fuerte potencia
  - Arranque a par resistente creciente
  - Punta de corriente elevada
  - Aparellaje importante y voluminoso con mantenimiento
- \* **Sin ajuste de parámetros**

Operación: se cierra 1, cuando llega aproximadamente al 80% de la velocidad nominal, se cierra 2 y se abre 1

En motores de alta tensión (2.300/4.800 V.) se usan preferentemente reactancia en vez de resistencias por tener menores problemas de aislamiento.

### 5) Por auto-transformador.

Es un arranque a tensión reducida, con la ventaja sobre el  $Y\Delta$  que se pueden obtener más de un escalonamiento. Y en la conexión a transición cerrada, no se interrumpe la corriente en el paso de una tensión a otra.

El arranque se efectúa en tres tiempos: 1) cierre del contacto de línea y conexión estrella del auto-transformador. 2) apertura del neutro. Una fracción del devanado queda en serie como una reactancia. 3) se acopla el motor a plena tensión y se abren los dos anteriores..

A fin de evitar una disminución importante de la velocidad durante el segundo tiempo la inductancia debe ser pequeña por lo que es necesario dotar de entrehierro al circuito magnético. El segundo tiempo no deber ser muy prolongado: La  $I_a$  y la  $M_a$  varían inversamente proporcionales al cuadrado de la relación de transformación:

La relación de transformación es:  $K = U_L / U_M$

La corriente en el motor:  $I_M = U_M / Z_M = U_L / K \cdot Z_M$

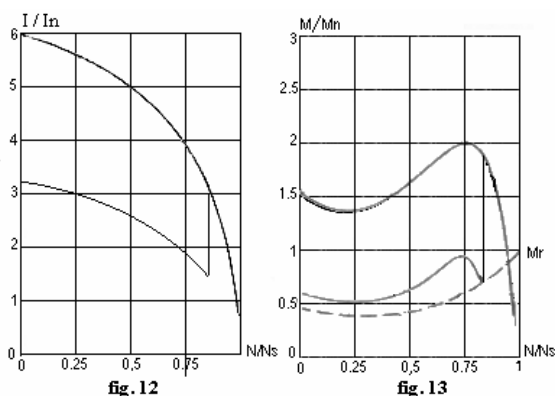
La corriente de arranque en línea:  $I_{aL} = I_M / K = U_L / K^2 \cdot Z_M$

La corriente de arranque nominal:  $I_{an} = U_L / Z_M$

Luego:  $I_{aL} = \frac{1}{K^2} I_{an}$  o sea disminuye  $K^2$  veces.

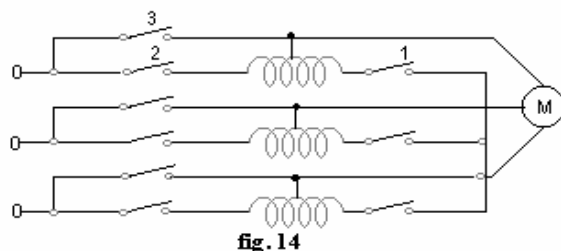
Y para los momentos:  $M_a = U_M^2 / Z_M$ ;  $U_M = U_L / K$   $\therefore M_a = \frac{1}{K^2} U_L^2 / Z_M$

Este sistema es utilizado en motores de gran potencia.



- \* **Corriente de arranque** –fig. 12-  
1,7 a 4 veces la corriente nominal
- \* **Par de arranque** –fig. 13-  
0,4 a 0,85 veces el par nominal
- \* **Características**
  - Motor 3 bornas, fuerte potencia
  - Caída de tensión y punta de corriente elevada durante el acoplamiento a plena tensión
  - Aparellaje complejo y voluminoso con mantenimiento
- \* **Sin ajuste de parámetros**

Circuito a transición cerrada fig. 14



Procedimiento: 1º) cierra 1 y 2: arranca a tensión reducida como auto-transformador Y/Y.-2º) abre 1: queda como una reactancia en serie.- 3) cierra 3 abre 2: queda directo.- Se operó la transición sin interrumpir la corriente.

## 6) Con anillos rozantes

Consiste en agregar resistencias variables conectadas al rotor: En el momento del arranque se encuentra toda la resistencia incluida, la curva de par se traslada al origen lo que determina un arranque a par máximo. A medida que la máquina tome velocidad se excluye paulatinamente la resistencia, lo que desplaza la curva a su valor nominal, momento en que se cortocircuita la resistencia excluyéndola del circuito. De esta forma se obtiene par máximo de arranque con corriente de arranque reducida, porque el circuito tiene un  $R_a$  adicional. Al excluir la  $R_a$  se evitan las pérdidas  $R \cdot I$  en la misma. La variación de la  $R_a$  se puede hacer 1) por escalones, 2) por resistencias líquidas de variación continua y 3) por medio electrónicos. La corriente absorbida es sensiblemente proporcional al par suministrado. Por ejemplo, para un par inicial de arranque igual a  $2 M_n$  la punta de corriente será aproximadamente  $2 I_n$ . El motor de anillos se usa en las máquinas que deban arrancar a plena carga.

(Recordar la teoría del momento motor y sus conclusiones, pág.167 y ver Control por variación de  $I_2$  con resistencia rotórica en el tema "variación de velocidad", pág. 193).

## 7) Arranque electrónico por tensión variable y limitación de corriente

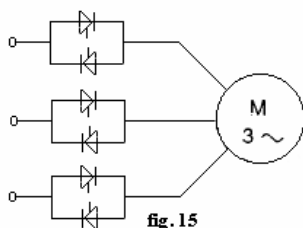


fig. 15

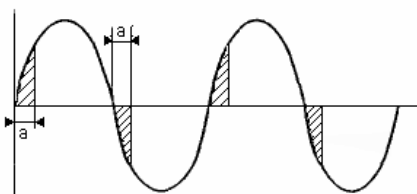


fig. 16

La alimentación del motor asíncrono trifásico, mediante aumento progresivo de la tensión en el arranque, se obtiene por medio de un regulador cuyo circuito está compuesto por 6 tiristores, montados 2 a 2 en oposición en cada fase. Fig. 15

En función del instante y del ángulo de encendido de los tiristores, permite suministrar una tensión que aumenta progresivamente a frecuencia fija. Fig. 16

El aumento progresivo de la tensión de salida puede controlarse mediante la rampa de aceleración, depender de la limitación de corriente, o supeditarse a estos dos parámetros a la vez.

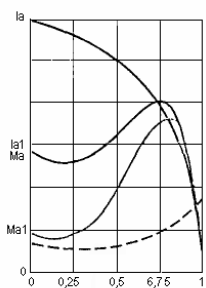


fig. 17

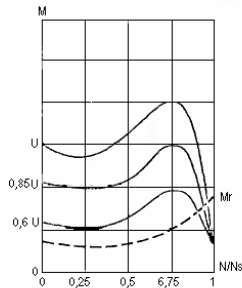


fig. 18

La figura 17 muestra la evolución del par en función de la corriente de arranque.

La limitación de la corriente de arranque  $I_a$  a un valor predeterminado  $I_{a1}$  provoca una reducción del par de arranque  $M_{a1}$  prácticamente igual a la relación del cuadrado de las corrientes  $I_a$  e  $I_{a1}$ .

### Ejemplo:

En un motor de características  $M_a = 2 M_n$  para  $I_a = 6 I_n$ , la limitación de corriente en  $I_{a1} = 3 I_n$ , es decir  $0,5 I_a$ , da un par de arranque:

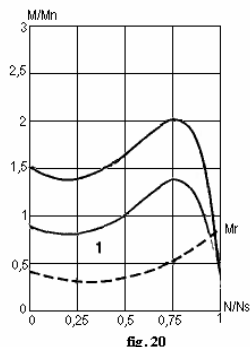
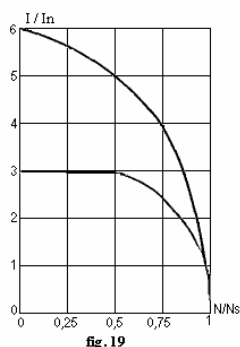
$$M_{a1} = M_a \times (0,5)^2 = 2 M_n \times 0,25 = 0,5 M_n.$$

La figura 18 muestra la característica par / velocidad de un motor de jaula en función de la tensión de alimentación. El par varía con el cuadrado de la tensión a frecuencia fija. El aumento progresivo de la tensión limita el par y la corriente en el arranque y suprime la punta de corriente en la puesta en tensión.

El arrancador relentizador es un regulador de 6 tiristores que permite arrancar y parar de forma controlada los motores asíncronos trifásicos de jaula

Ello garantiza

- El control de las características de funcionamiento, especialmente durante los períodos de arranque y de parada,
- La protección térmica del motor y del arrancador,
- La protección mecánica de la máquina accionada, eliminando los impulsos de par y reduciendo la corriente de arranque,
- El control del par acelerador en toda la zona 1,
- La adaptación de la curva de par motor a la aplicación.



#### •Corriente de arranque -fig. 19-

Ajustable de 2 a 5 veces la corriente nominal.

#### Par de arranque -fig. 20-

Variable de 0,15 a 1 vez el par nominal.

#### •Características

- Motor 3 bornes, potencia 2,2 a 800kW,

- | n ajustes independientes.

- Posibilidad de frenado por inyección de corriente continua.

- Aparato sin mantenimiento.

#### • Con ajuste de parámetros

Estos equipos disipan mucho calor, para no dejar trabajando permanentemente a los tiristores suele ser conveniente conectar un by-pass puenteándolo un vez usado.

### 8) Jaulas especiales

Se puede reducir la corriente de conexión en el arranque y, no obstante, incrementar el par correspondiente, consiguiendo artificialmente un aumento aparente de la resistencia en el arranque.

En los **motores de ranuras profundas** se utiliza el efecto pelicular. La ranura y la barra rotórica (fig. 21) son altas y estrechas.

En funcionamiento normal la corriente de pequeña frecuencia  $f_2 = s \cdot f_1$  se comporta prácticamente como una corriente continua y la resistencia de la barra difiere poco de la que se mide en corriente continua. Por el contrario, en el arranque la frecuencia de la corriente inducida es de 50 hertz (lo que es ya un valor elevado para esta barra de gran altura). La densidad de corriente no es uniforme (es mucho mayor en la proximidad del entrehierro). Para la misma corriente, las pérdidas por efecto Joule aumentan, lo que significa un incremento de la resistencia aparente, la cual resulta multiplicada por un coeficiente:

$$k_n = \frac{\text{pérdidas Joule en corriente alterna para la misma intensidad}}{\text{pérdidas Joule en corriente continua eficaz en la barra}}$$

Lo que permite obtener el efecto que se desea.

En las **máquinas de doble jaula** hay dos jaulas secundarias.

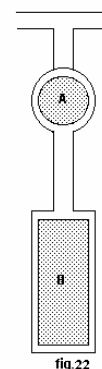
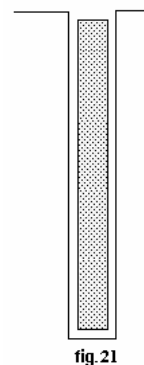
Denominemos A a la jaula **exterior**, es decir, a la que está más cerca del entrehierro, y B a la jaula **interior** (fig. 22).

Todo ocurre como si estas dos jaulas estuviesen en paralelo.

**La jaula exterior A tiene una, resistencia mucho más elevada que la de B,** generalmente por dos razones:

- está constituida por un material de mayor resistividad (por ejemplo, latón en lugar de cobre),
- es de menor sección.

**La jaula interior B tiene una reactancia de dispersión mucho mayor que la de A** porque está profundamente introducida en el hierro y separada de A por un istmo alto y estrecho (en el cual algunos constructores colocan también hierro para regular la reactancia de dispersión).



Las dos impedancias secundarias conectadas en paralelo son, pues:  $Z_A$  y  $Z_B$

Rotor parado,  $f_1 = \text{grande}$

$$Z_A = R_A + j2\pi f_1 L_A$$

Con rotor parado, las resistencias son relativamente pequeñas con respecto a las reactancias y la mayor parte de la corriente del secundario pasa por la jaula A, que por esta razón se llama también **jaula de arranque**.

Por el contrario, en marcha normal, como  $S$  es muy pequeña, ya no intervienen prácticamente las reactancias en las impedancias.

Rotor en marcha,  $sf_1 = \text{chico}$

$$Z_B = R_B + j2\pi sf_1 L_B$$

Todo ocurre como si se tuviesen solamente las resistencias  $R_A$  y  $R_B$  en paralelo.

La mayor parte de la corriente pasa, pues, ahora, por la jaula interior (**jaula de funcionamiento normal**).

Así se pueden obtener pares de arranque del orden de 2 veces el par nominal, que a veces representa el par máximo de la máquina, en tanto que el deslizamiento en marcha normal es, no obstante, pequeño. La figura 23 representa la curva del par de esta máquina.

Son características de este motor poseer un **menor  $\cos\phi$**  y corriente de arranque, pero mayor momento de arranque que uno de jaula normal.

Valores típicos:  **$r_{ext.} = 5$  a  $6$  veces la  $R_{int.}$**

$$M_a/M_n = 1 \text{ a } 2$$

$$I_a/I_n = 3,2 \text{ a } 5$$

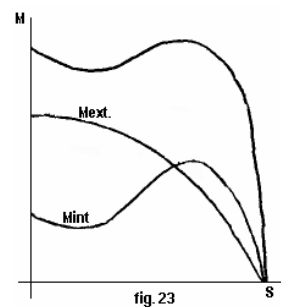


fig. 23