

## MÁQUINAS Y ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS (3M4)

# Trabajo Práctico N° 6: Arranque y Accionamientos Eléctricos de Motores Asincrónicos Trifásicos (MTI)

## Objetivos

En el siguiente práctico, se pretende ensayar la **máquina asincrónica trifásica o máquina trifásica de inducción (MTI)** desde el aspecto práctico de los accionamientos eléctricos y de los distintos arreglos topológicos de los circuitos eléctricos para modificación de la característica durante el arranque (régimen transitorio) de la máquina en cuestión. Cabe mencionar que también se ensayará un “tipo especial” de máquina asincrónica la cual permite variar su resistencia rotórica ( $r_2'$ ) conocida como **máquina asincrónica trifásica de rotor bobinado con anillos rozantes**.

## Introducción teórica

Durante la puesta en tensión de un motor, la corriente solicitada es considerable (varias veces mayor a la nominal o de régimen permanente de la máquina) y puede provocar una **caída de tensión** que afecte al funcionamiento del resto de las cargas de la instalación y muy especialmente en caso de insuficiencia de la sección de los conductores de la línea de alimentación. En ocasiones, la caída de tensión es tal que puede llegar a provocar el reencendido de sistemas de alumbrado (lámparas de vapor) como la puesta fuera de servicio de otras máquinas o equipos más sensibles que se encuentren en funcionamiento.

Para poner remedio a estos inconvenientes, ciertas reglamentaciones del sector eléctrico prohíben o desaconsejan el uso de **motores de arranque directo** que superen cierta potencia. Otros se limitan a imponer la relación entre la corriente de arranque y la nominal en base a la potencia de los motores. Los **motores de jaula de ardilla** son los únicos que pueden acoplarse directamente a la red por medio de un equipamiento simple. Tan sólo las extremidades de los devanados del estator sobresalen de la placa de bornes. Dado que el fabricante determina de manera definitiva las características del rotor, los **distintos procesos de arranque consisten principalmente en hacer variar la tensión en los bornes del estator**. En este tipo de motores, cuya frecuencia es constante, la **reducción de la magnitud de corriente conlleva de manera automática a una fuerte reducción del par motor**.

## Arranque de un MTI

Como hemos estudiado, la corriente de arranque de los motores de inducción con rotor en jaula de ardilla puede alcanzar valores comprendidos entre 6 y 8 veces la nominal. Este comportamiento se debe a que a bajas velocidades (deslizamiento elevado, valores cercanos a 1) la impedancia del rotor es muy baja debido a que también lo es la frecuencia. Si a esto se le agrega que la componente resistiva es igualmente reducida, se comprende la afirmación inicial acerca del valor de la corriente de arranque.

En términos generales, esta situación no resulta perjudicial para los motores de inducción a causa de la corta duración del fenómeno; además, es habitual que el arranque se produzca en condiciones de máquina fría (si es que la puesta en marcha coincide con el inicio de su actividad).

Desde el punto de vista de la red la situación es diferente: las grandes intensidades transitorias dan lugar a caídas de tensión inadmisibles para el resto de los usuarios y, en determinadas circunstancias, calentamientos importantes en los conductores. Por otra parte, las perturbaciones en la tensión pueden conducir a un mal funcionamiento de dispositivos tales como: contactores, relevadores térmicos, etc.; situación que puede dar lugar a la desconexión intempestiva de las cargas a ellos relacionadas. Estos problemas se acentúan cuando el motor debe realizar un arranque pesado, es decir, debe mover una carga mecánica con mucha inercia que requiere de un alto par. En estas condiciones el arranque puede ser de larga duración (del orden del minuto), y resulta inadmisibles para la red una corriente de arranque tan elevada y una abrupta caída de tensión durante este tiempo prolongado.

### Arranque Estrella - Triángulo

Una forma de salvar estas situaciones es la de utilizar procedimientos de arranque a tensión reducida. En particular, el más conocido y generalizado, el “**Arranque estrella triángulo**”, es uno de los más utilizados debido a su bajo costo relativo. Este recurso consiste en iniciar el arranque con el motor conectado en estrella para conmutar la conexión a triángulo una vez que se alcance una velocidad próxima a la nominal.

En estas condiciones la **tensión en el arranque** es:

$$U_Y = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$$

En estas condiciones la **corriente en el arranque** es:

$$I_Y = \frac{I_N}{3}$$

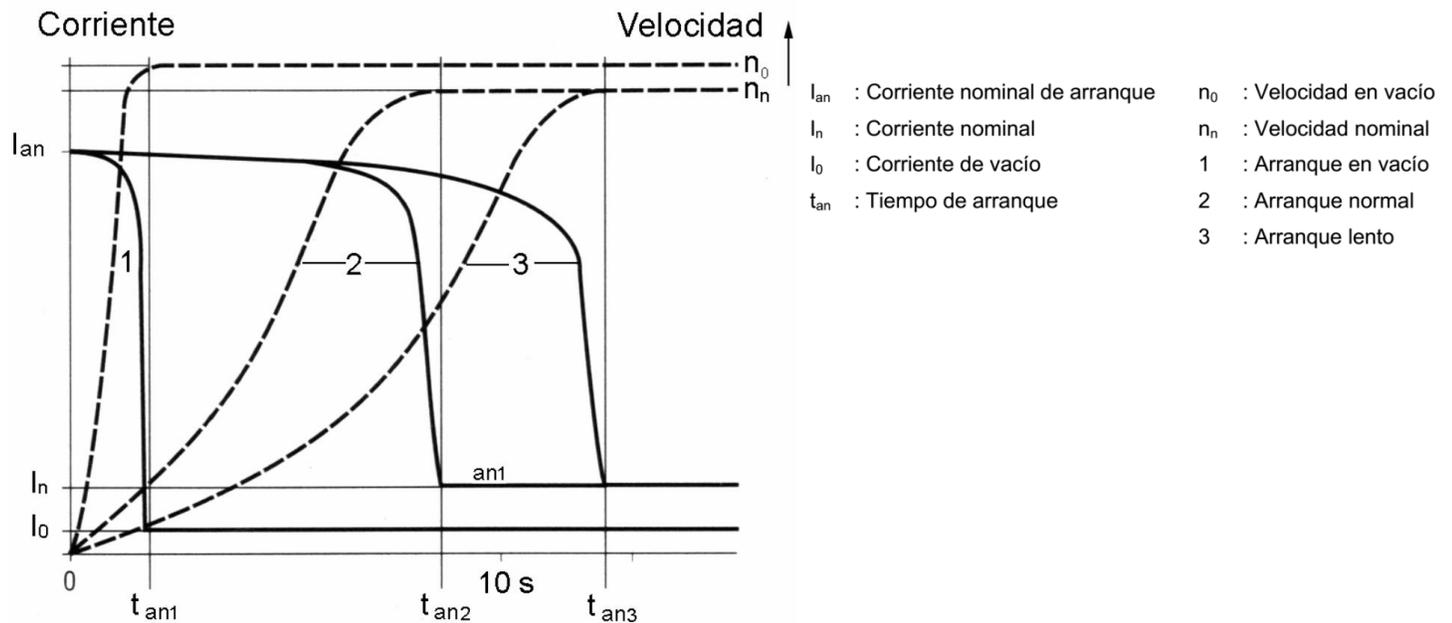
De donde se deduce la ventaja fundamental de este procedimiento pues, si la corriente de arranque es por ejemplo  $6 I_N$ , al implementar este método se reducirá hasta aproximadamente  $2 I_N$ .

Debido a que la **cupla motora varía en forma inversamente proporcional al cuadrado de la tensión** (como se verá a continuación), cualquier disminución de esta última dará lugar a una reducción de

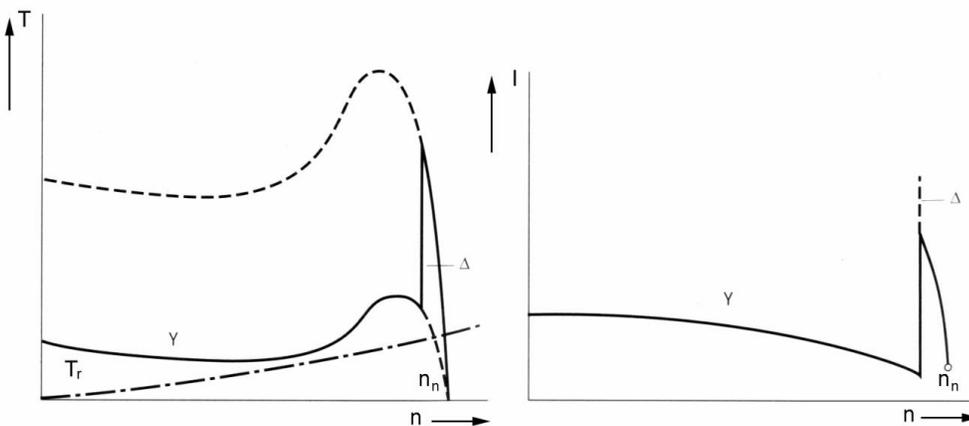
la primera de acuerdo con la ley indicada. Así, en este caso, la cupla de arranque será 3 veces menor que la nominal. Esta situación implica que los procedimientos de arranque a tensión reducida son inadecuados para cargas de elevado par resistente (a menos que se adopten soluciones particulares).

Por otra parte, para que un determinado motor pueda arrancarse utilizando este método, el valor de su tensión nominal debe cumplir con cierto requisito relacionado con la red sobre la que se lo conecta.

A modo ilustrativo y para comprender lo mencionado, la siguiente figura muestra las curvas características de **corriente y velocidad en función del tiempo**, para tres situaciones distintas de carga:



En tanto, las siguientes curvas demuestran **curvas características de cupla y la corriente en función de la velocidad**, para el caso de un arranque "Y-d".



**NOTA:** Obsérvese la disminución de la cupla motora en la conexión estrella y como la resistente debe permanecer por debajo de ella para que el arranque sea exitoso.

## Expresiones de las cuplas eléctricas intervinientes

Al energizar un motor eléctrico este desarrollará un **par electromagnético o par motor ( $M_m$ )** que es función de la velocidad, y que tenderá a acelerar la carga acoplada a su eje. Esta carga presentará al motor un **par resistente o par antagónico ( $M_{res}$ )**, cuya variación en función de la velocidad depende de la naturaleza del accionado (carga mecánica).

La diferencia entre ambos pares es el denominado **par aceleratriz ( $M_{ace}$ )**. Este es el responsable de la aceleración del mecanismo accionado, desde el reposo hasta una velocidad tal en que se igualen los pares antagónico y motor, es decir: par aceleratriz nulo.

A continuación adjuntamos algunas expresiones para la determinación de las cuplas mencionadas:

### ➤ **Par electromagnético o motor " $M_m$ "**

$$M_m = \frac{P_{CR}}{w_s} = \frac{N \cdot U_f^2 \cdot R_2'}{s \cdot w_s \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} = \frac{N \cdot U_f^2 \cdot R_2'}{s \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot n_s}{60} \right) \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{cc})^2 \right]}$$

Donde:

$M_m$ : par motor;

$P_{CR}$ : potencia del campo rotante;

$w_s$ : velocidad de sincronismo;

$N$ : número de fases;

$U_f$ : tensión de fase;

$R_1$ : resistencia estática;

$R_2'$ : resistencia rotórica (referida al estator);

$X_1$ : reactancia estática;

$X_2'$ : reactancia rotórica (referida al estator);

$X_{cc}$ : reactancia de bloqueo o de cortocircuito;

$s$ : deslizamiento.

### ➤ **Par resistente o antagónico " $M_{res}$ "**

La expresión matemática, **expresión de Vershenevski**, del par resistente variable con la velocidad angular es:

$$M_{res} = M_0 + (M_n - M_0) \cdot \left( \frac{n}{n_n} \right)^x$$

Donde:

$M_{res}$ : cupla antagónica a la velocidad "n", en [Nm];

$M_0$ : cupla antagónica inicial (a velocidad cero), en [Nm];

$M_n$ : cupla antagónica nominal (a velocidad nominal), en [Nm];

n: velocidad en el punto de estudio, en [rpm];

$n_n$ : velocidad nominal del motor, en [rpm];

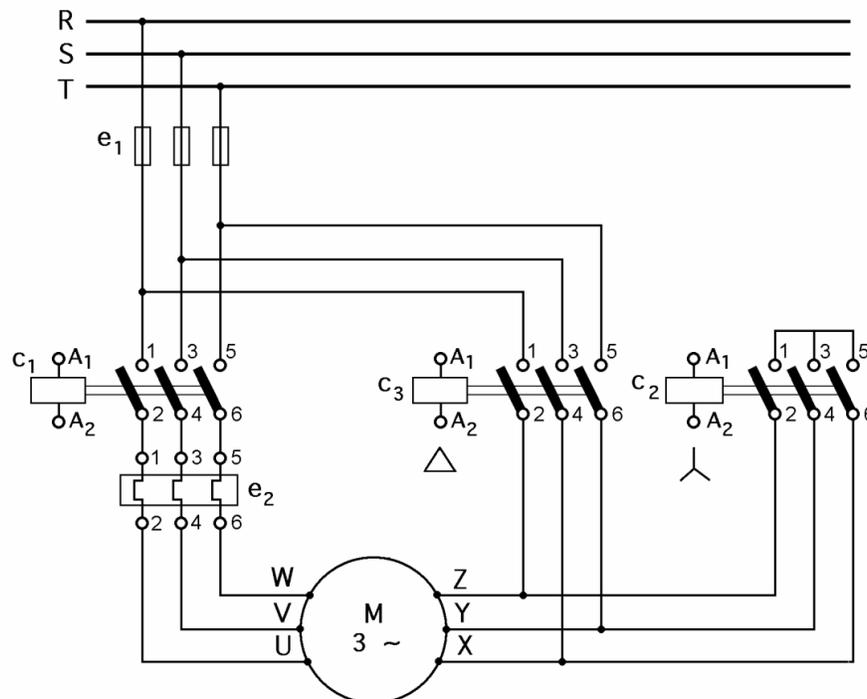
x: coeficiente que caracteriza el tipo de cupla resistente del accionado.

### ➤ Par aceleratriz " $M_{ace}$ "

Como ya hemos mencionado, la resultante de las cuplas intervinientes determinará la aceleración de la máquina motriz, y por ende del accionado.

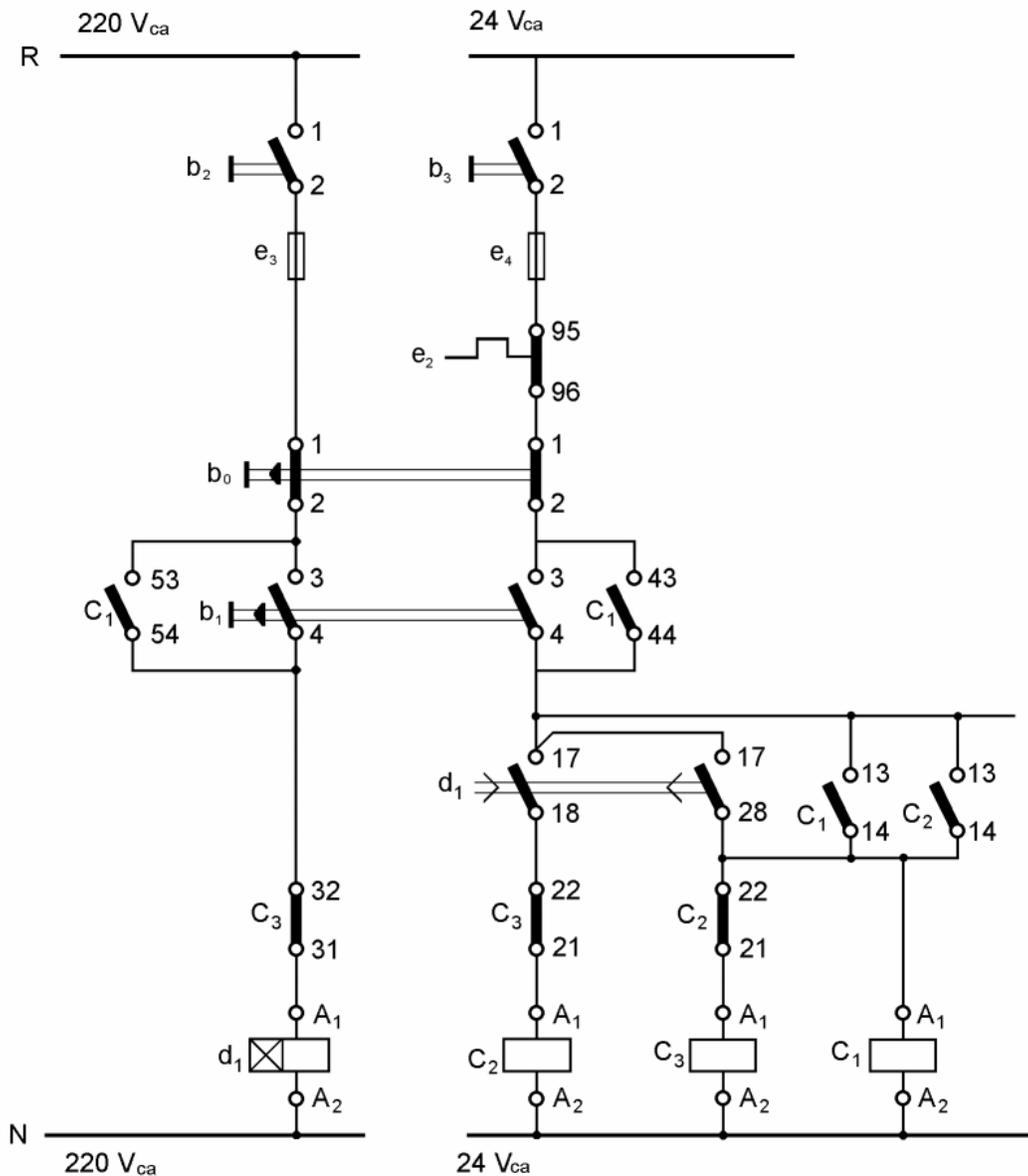
$$M_{ace} = M_m - M_{res}$$

### Esquema funcional de POTENCIA: Arranque Estrella - Triángulo



### Componentes del circuito

- **Contactador de LÍNEA:**  $C_1$  (3 NA + 3 NC)
- **Contactador para conexión ESTRELLA:**  $C_2$  (3 NA + 3 NC)
- **Contactador para conexión TRIÁNGULO:**  $C_3$  (3 NA + 3 NC)
- **Motor Trifásico de Inducción:** M (accesibilidades a sus 6 bornes)
- **Fusibles de entrada:**  $e_1$

**Esquema funcional de MANDO:** Arranque Estrella - Triángulo

*NOTA: el circuito real de la práctica puede tener algunas diferencias con este esquema funcional, pero la funcionalidad es la misma en ambos casos.*

Componentes del circuito

- **Temporizador:** d<sub>1</sub> (17-28 temporizado al cierre; 17-18 temporizado a la apertura)
- **Pulsador de parada:** b<sub>0</sub> (2 NC + 2 NA)
- **Pulsador de marcha:** b<sub>1</sub> (2 NC + 2 NA)

## **Arranque por Resistencia Rotórica de Motores Asincrónicos Trifásicos**

Para poner en marcha un accionamiento con cupla antagónica elevada durante todo el proceso de arranque, *no se puede recurrir a los sistemas de tensión reducida* (arranque estrella triángulo o arranque por autotransformador), *ya que en estos se reduce notablemente la cupla motora.*

En este caso, si no es necesario reducir la corriente de arranque, se podrá optar por el arranque directo, eligiendo un motor con elevada cupla de arranque, estos son los de doble jaula. Debe considerarse que para igualdad de características un motor de este tipo tiene *menos rendimiento y menor factor de potencia.*

Cuando la *cupla del motor con doble jaula no fuera suficiente o cuando además de aumentar la cupla se necesita reducir la corriente de arranque*, se debe recurrir a un **motor de rotor bobinado y anillos rozantes**.

También suele ser imprescindible el **arranque con resistencias** cuando las *condiciones de arranque son difíciles desde el punto de vista térmico*, es decir, cuando debe acelerar una gran masa de inercia. Al contrario que en el rotor de jaula, donde el calor del proceso de arranque (o frenado) se desarrolla solo en el rotor, en el caso de motor con anillos rozantes, una parte importante de calor se disipa en la resistencia externa al mismo.

Un motor de anillos rozantes no puede arrancar en directo (devanados rotóricos cortocircuitados) sin provocar picos de corriente inadmisibles. Es necesario **insertar en el circuito rotórico resistencias que se cortocircuiten progresivamente**, al tiempo que se alimenta el estator a toda la tensión de red.

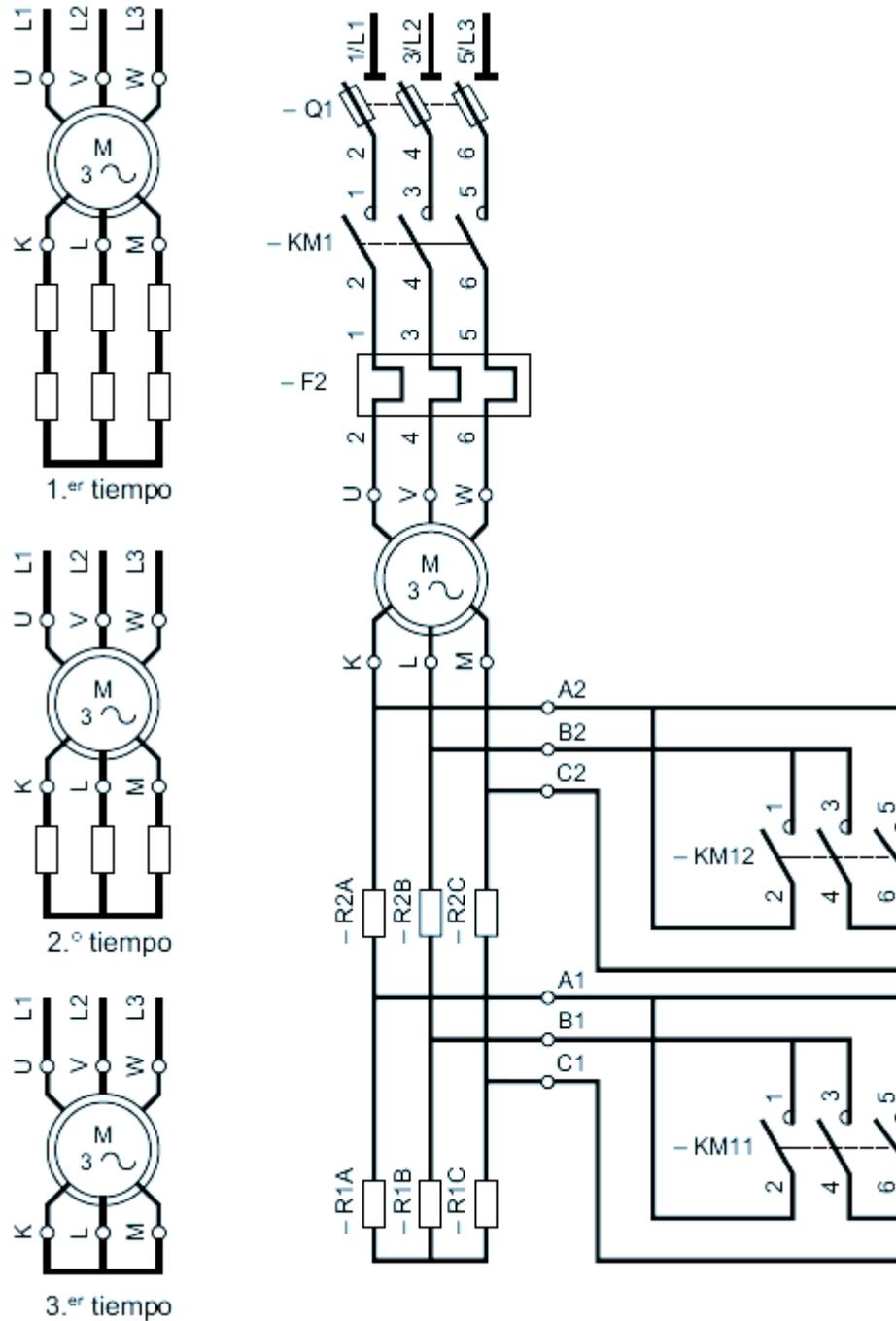
El cálculo de la resistencia insertada en cada fase permite determinar con rigor la curva de par-velocidad resultante: *“para un par dado, la velocidad es menor cuanto mayor sea la resistencia”*

Como resultado, la resistencia debe insertarse por completo en el momento del arranque y la plena velocidad se alcanza cuando la resistencia está completamente cortocircuitada. La corriente absorbida es prácticamente proporcional al par que se suministra. Por ejemplo, el pico de corriente correspondiente a un par de arranque de  $2 C_n$  es aproximadamente de  $2 I_n$ . Por tanto, el pico de corriente es considerablemente más débil, y el par máximo de arranque más elevado, que en el caso de un motor de jaula, en el que el valor normal se sitúa en torno a  $6 I_n$  para  $1,5 C_n$ .

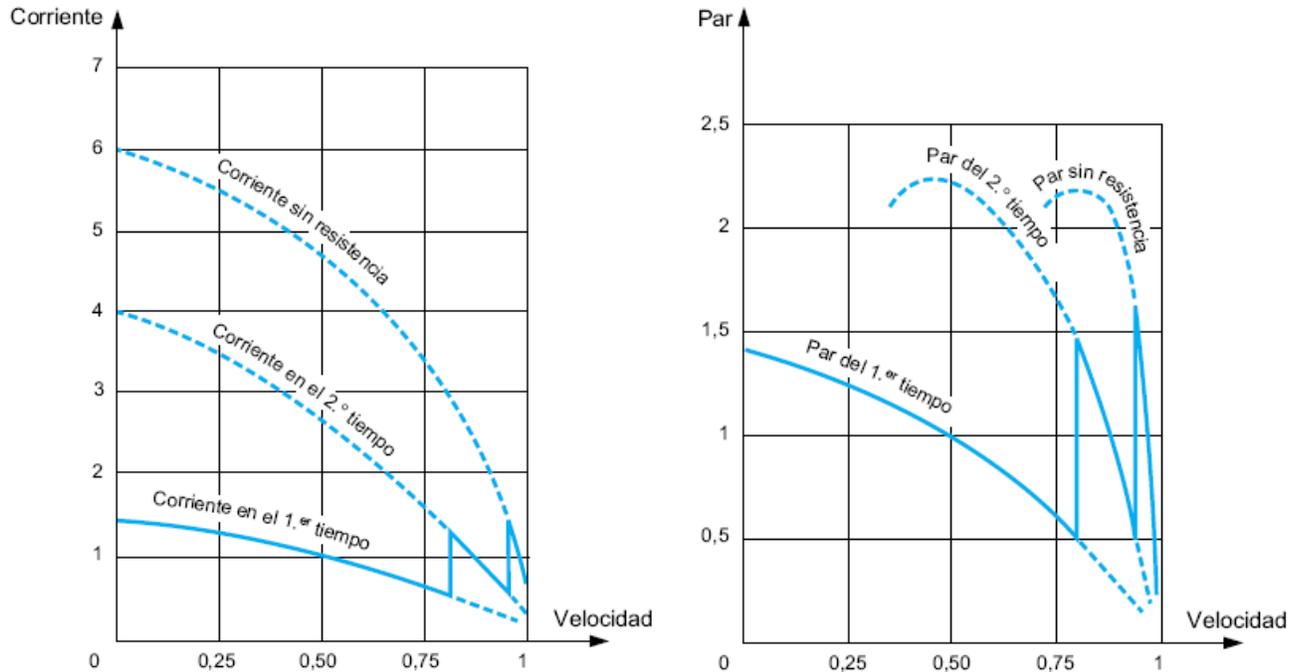
*El motor de anillos con arranque rotórico se impone, por tanto, en todos los casos en los que los picos de corriente deben ser débiles y cuando las máquinas deben arrancar a plena carga.*

Por lo demás, este tipo de arranque es sumamente flexible, ya que resulta fácil adaptar el número y el aspecto de las curvas que representan los tiempos sucesivos a los requisitos mecánicos o eléctricos (par resistente, valor de aceleración, pico máximo de corriente, etc.).

En la siguiente figura podemos observar el esquema funcional para el arranque por resistencias rotóricas de un motor trifásico de inducción:



En las siguientes gráficas ilustramos, teóricamente, la respuesta que se obtiene al insertar resistencias óhmicas en serie con el bobinado rotórico:



En resumen, las características de este tipo de arranque, son las siguientes:

- Corriente de arranque: 70%
- Sobrecarga de la línea: Menor a  $2,5 I_n$
- Par inicial de arranque: Menor a  $2,5 M_n$
- Mando: de 1 a 5 posiciones
  
- Ventajas:
  - Excelente relación par – corriente.
  - Posibilidad de ajuste de los valores en el arranque.
  - Sin corte de alimentación durante el arranque.
  
- Desventajas:
  - Motor de anillos, más costosos y mayor mantenimiento debido a los anillos rozantes.
  - Necesita resistencias.

## **Ensayos de laboratorio**

En esta práctica de laboratorio se llevarán a cabo una serie de ensayos demostrativos, sin necesidad de registrar valores experimentales pero si consideraciones prácticas que surgirán de lo comentado por los profesores a cargo de la misma y que permitirán extraer conclusiones valiosas para afianzar los conceptos vistos en la teoría.

Las distintas etapas de esta práctica son:

### **1) Arranque estrella - triángulo**

Procederemos a desarrollar esta experiencia mediante 2 formas. Una consistirá en aplicar el método de arranque de **forma manual**, mediante una caja conmutadora de mando de 3 posiciones, y la otra de **forma automática**, mediante aplicación de 3 contactores, 1 temporizador y 2 pulsadores de marcha y parada (ver esquema funcional en la introducción).

### **2) Arranque por resistencias rotóricas**

Siguiendo lo visto en la introducción teórica, procederemos a arrancar un MTI por anillos rozantes mediante la inserción de resistencias rotóricas ( $r_2'$ ) que irán disminuyendo su valor hasta cero, punto en el cual consideraremos en nuestro caso a la máquina trabajando en régimen permanente.

### **3) Empleo de un variador de frecuencia**: controlado vía entradas auxiliares

Mediante la utilización de la electrónica de estado sólido es posible “interponer” en el circuito de potencia de alimentación de la máquina un elemento o dispositivo que nos permita “controlar” el arranque como el funcionamiento permanente según criterios predefinidos y calculados, según necesidad del accionamiento analizado.

En esta experiencia usaremos un **variador de frecuencia (VFD, en inglés) monofásico**, el cual nos permitirá variar la relación “V/f”, mediante la electrónica de potencia (transistores de potencia controlados por compuerta) que hará posible variar la velocidad a la salida del mismo, o sea, a la entrada del MTI. En este caso, se hará uso de las entradas auxiliares (analógicas y digitales) con las que cuenta este dispositivo.

### **4) Empleo de un variador de velocidad**: controlado vía PC

Siguiendo lo comentado anteriormente, haremos uso de un **variador de velocidad (VSD, en inglés) trifásico**, controlado mediante el puerto serie de una PC por comunicación MODBUS RS485 (half dúplex). Este tipo de accionamiento es lo más próximo al control de un proceso productivo “tipo”, en el cual el operador se encuentra delante de una interfaz gráfica (interfaz hombre-máquina, HMI en inglés) supervisando y controlando las variables instantáneas medidas del proceso productivo al que se refiera.

Para nuestro caso particular, nuestro accionamiento consistirá en un generador sincrónico de imanes permanentes (GSIP) el cual se encuentra acoplado al eje de un MTI, mediante caja reductora de por medio, donde a este último lo controlaremos a través de un VSD vía PC, ya comentado.

### **5) Arranque de un Motor Monofásico de Inducción (MMI)**

Como algo particular, ensayaremos a este tipo de maquina empleada mayormente en aquellos procesos que demanden una potencia útil baja (hasta 10 HP). Se deberá tomar nota de la particularidad del circuito eléctrico interno de la máquina durante el arranque y en régimen, y sacar conclusiones del porqué del mismo.

### **Informe a cargo del alumno**

Cada comisión debe presentar un informe que contenga la siguiente información general como mínimo, además de las tareas particulares del presente trabajo práctico:

- Breve introducción teórica de las prácticas realizadas. Especificaciones principales de las máquinas utilizadas (ver chapas características).
- Esquemas de los circuitos reales utilizados de acuerdo al equipamiento disponible.
- Conclusiones extraídas de cada práctica a partir de los conceptos vistos en la introducción y de los comentarios de los profesores.