

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

DOCUMENTACIÓN DE LA PRÁCTICA DE LABORATORIO:

MÁQUINAS ASÍNCRONAS O DE INDUCCIÓN

1.- CONEXIONADO DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN

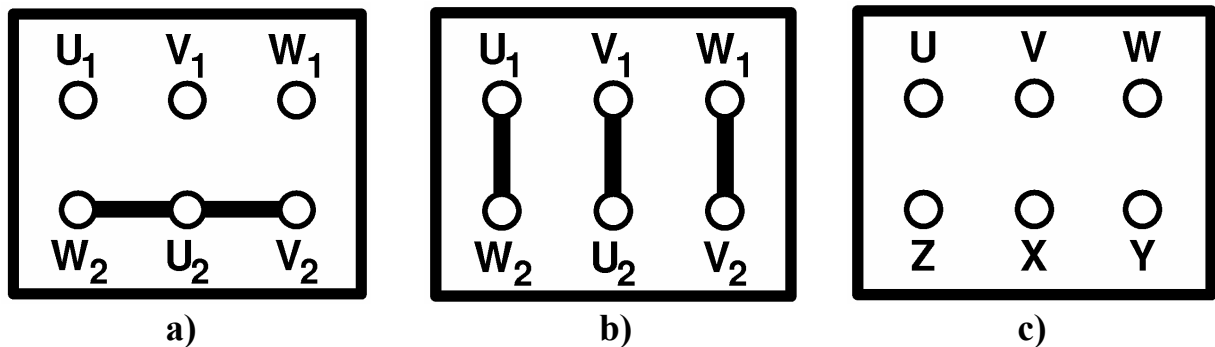


Fig. 1: Caja de bornes de un motor asíncrono trifásico:

a) Conexión estrella; b) Conexión triángulo; c) Denominación antigua

Dependiendo de si se conectan en estrella o en triángulo, los motores asíncronos trifásicos pueden funcionar con dos tensiones diferentes que guardan entre sí una relación de $\sqrt{3}$. Así, un motor de 400/230 V es un motor que está calculado para que sus fases funcionen alimentadas a 230 V. Si el motor está conectado en triángulo deberá ser alimentado con una red cuya tensión de línea sea de 230 V. Si el motor está conectado en estrella, cada fase recibe una tensión $\sqrt{3}$ veces menor (la tensión fase-neutro) que la de línea y el motor deberá ser alimentado por una red cuya tensión de línea sea de 400 V.

La caja de bornes de estos motores está dispuesta de manera que resulte fácil realizar las conexiones estrella o triángulo (Fig. 1). Los principios de los devanados de las tres fases de una máquina asíncrona trifásica se denominan U₁, V₁ y W₁, respectivamente, mientras que los finales se llaman U₂, V₂ y W₂. En la caja de bornes estos extremos de las fases se disponen en dos filas de tres terminales cada una, desplazando una posición las fases de una fila respecto de la otra. De esta manera, la conexión estrella se realiza mediante puentes horizontales (Fig.1a) y la conexión triángulo mediante puentes verticales (Fig.1b). En ambos casos las tres fases de la red se conectan a los terminales U₁, V₁ y W₁. Antiguamente se utilizaban las letras U, V y W para denominar los principios de las fases (en lugar de U₁, V₁ y W₁) y las letras X, Y y Z para los finales (en lugar de U₂, V₂ y W₂) (véase la Fig. 1c). En muchas figuras de este texto aparece esta denominación antigua.

2.- ARRANQUE DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN

2.1.- Arranque directo

Potencia Nominal del motor	Máximo valor admisible del cociente I_{cc} / I_{IN}
0,75 - 1,5 kW	4,5
1,5 - 5 kW	3,0
5 - 15 kW	2,0
más de 15 kW	1,5

Tabla 1: Valores máximos admitidos de la corriente de arranque

Se puede realizar el arranque de un motor asíncrono trifásico simplemente alimentándolo con su tensión nominal. Este procedimiento se denomina arranque directo y sólo se utiliza para motores de pequeña potencia. Esto es debido a que con este método la intensidad de arranque I_{cc} es muy grande (hasta 7 veces la intensidad nominal), lo que puede dañar al motor y provocar caídas de tensión en la red que afecten a otros abonados.

Por esta razón las compañías eléctricas obligan a utilizar métodos de arranque más suaves para motores de potencia superior a 0'75 kW. Así, la instrucción ITC-BT-47 del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión fija los valores máximos de la relación entre la intensidad de arranque y la de plena carga (Tabla 1).

2.2.- Arranque estrella-triángulo

Este sistema de arranque se utiliza con motores que estén preparados para funcionar en triángulo con la tensión de la red. Consiste en arrancar teniendo conectado el motor en estrella y pasarlo después a triángulo. De esta manera cada fase del motor recibe una tensión $\sqrt{3}$ veces menor que la nominal en el momento del arranque y así consume una corriente menor.

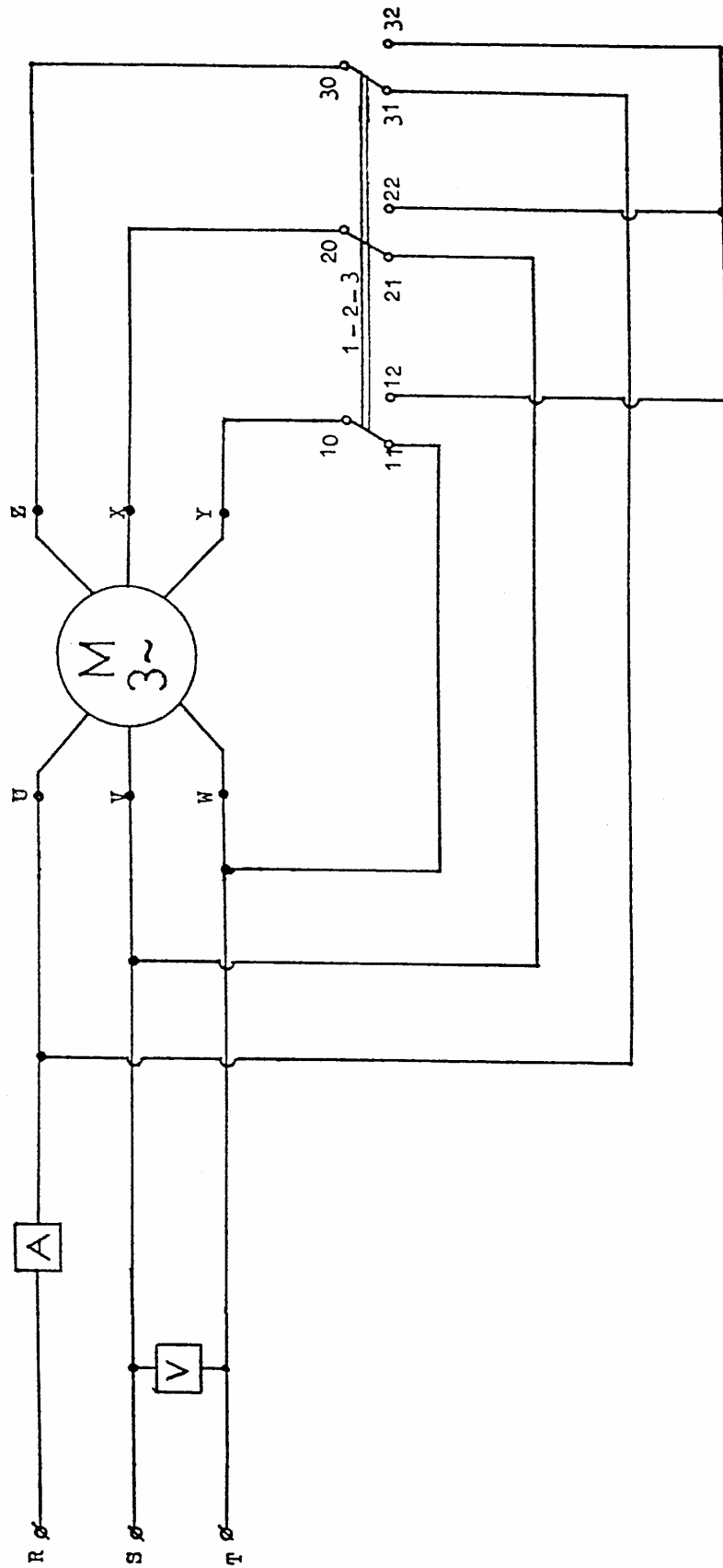


Fig. 2a: Arranque estrella-triángulo mediante un conmutador manual

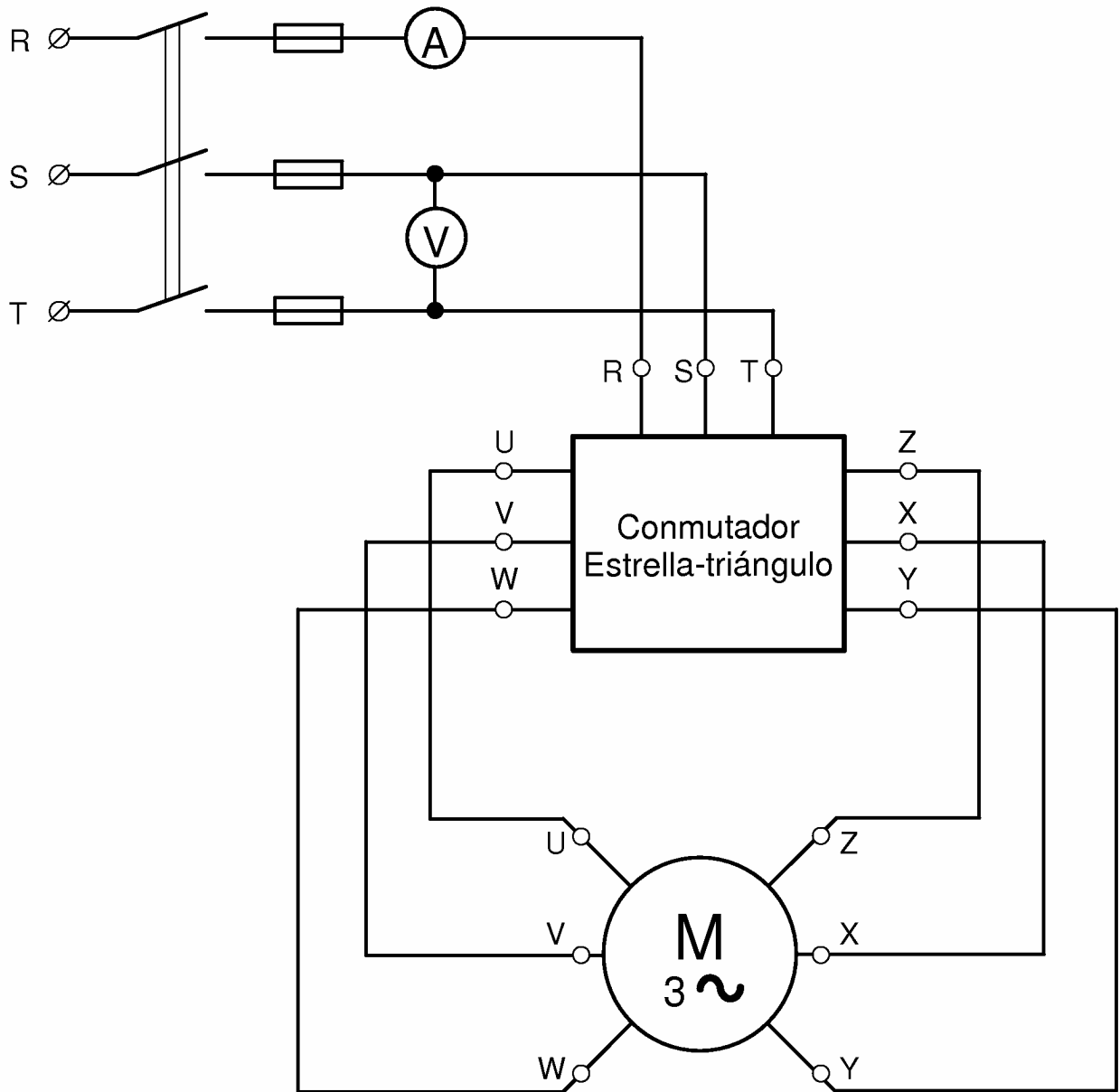


Fig. 2b: Arranque estrella-triángulo mediante un conmutador manual especialmente diseñado para esta maniobra

Con este sistema se consigue reducir el valor eficaz de la intensidad de arranque a $1/3$ del de la intensidad de arranque directo, pero el par de arranque también se reduce a un tercio. Esto puede presentar problemas si el motor debe arrancar en carga.

$$\left. \begin{aligned} I_{a\lambda} &= \frac{I_{cc}}{3} \\ M_{a\lambda} &= \frac{M_a}{3} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

La conmutación de la conexión estrella a la conexión triángulo se puede realizar de forma manual mediante el circuito representado en la Fig. 2a. El conmutador deja el motor conectado en triángulo cuando está en la posición representada en la figura y lo pone en estrella en la posición opuesta. Otro circuito para realizar la conmutación estrella-triángulo mediante un conmutador especialmente diseñado para esta maniobra se representa en la Fig. 2b.

También se puede realizar la conmutación estrella-triángulo de forma automática mediante contactores y relés o mediante autómatas programables.

2.3.- Arranque por autotransformador

Este sistema de arranque consiste en poner en marcha el motor con una tensión reducida suministrada por un autotransformador y conectarlo después a la tensión nominal, bien directamente, o bien a través de varios escalones de tensión intermedios.

Si se denomina x a la relación entre la tensión que suministra el autotransformador y la tensión nominal del motor, el par y la intensidad de arranque se reducen en un factor x^2 respecto al arranque directo:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{V_{Imotor}}{V_{IN}} = \frac{\text{Tension que suministra el autotransformador}}{\text{Tension nominal del motor}} \\ I_a &= x^2 I_{cc} \\ M_{a,aut} &= x^2 M_a \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

El hecho de que con este sistema el par de arranque disminuya puede originar problemas si el motor debe arrancar en carga.

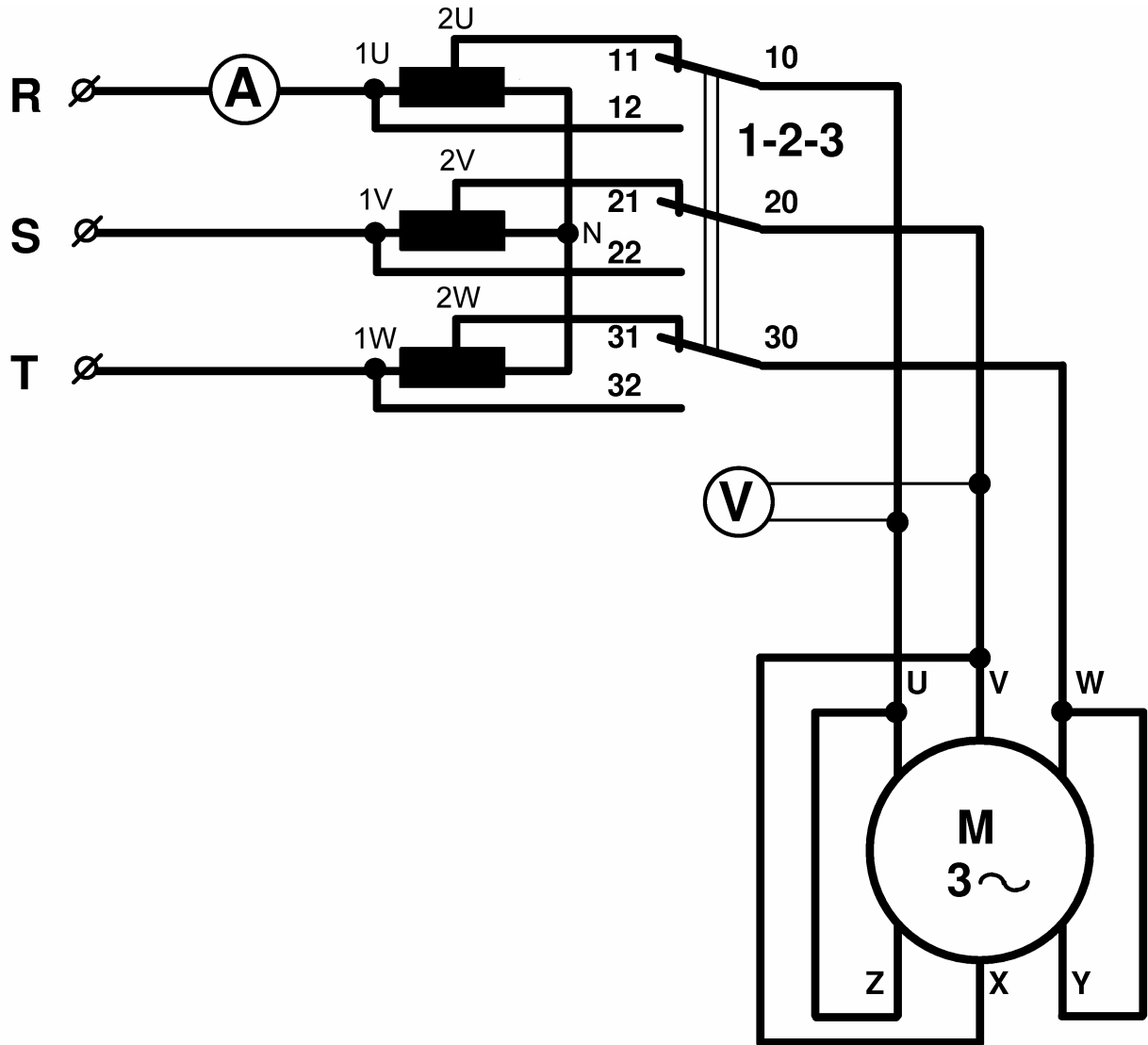


Fig. 3: Arranque por autotransformador

En la Fig. 3 se representa un circuito para el arranque con autotransformador mediante un conmutador manual de dos posiciones. En la posición del conmutador representada en la figura el motor recibe la tensión reducida y en la otra posición recibe la tensión de la red. En este circuito el arranque se realiza con un sólo escalón de tensión, pero en otros se puede realizar a través de varios escalones sucesivos. También se puede efectuar este tipo de arranque de manera automática mediante contactores y relés o mediante autómatas.

2.4.- Arranque por introducción de resistencias en serie con el rotor

Este sistema de arranque sólo se puede utilizar en motores de rotor bobinado y consiste en conectar una resistencia en serie con cada fase del rotor. Una vez arrancado el motor, se van disminuyendo progresivamente las resistencias puestas en serie con el rotor hasta que éste queda cortocircuitado.

Con este sistema se reduce la intensidad de arranque y se aumenta el deslizamiento en el que se produce el par máximo, pero sin que éste varíe. Incluso se puede obtener el par máximo en el arranque para una determinada resistencia R_{adic} conectada en serie con el rotor, cuyo valor reducido al estator R'_{adic} vale:

$$R'_{adic} = \sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2} - R_2' \quad (3)$$

donde R_1 es la resistencia del estator, R_2' es la resistencia del rotor reducida al estator y X_{cc} es la reactancia de cortocircuito.

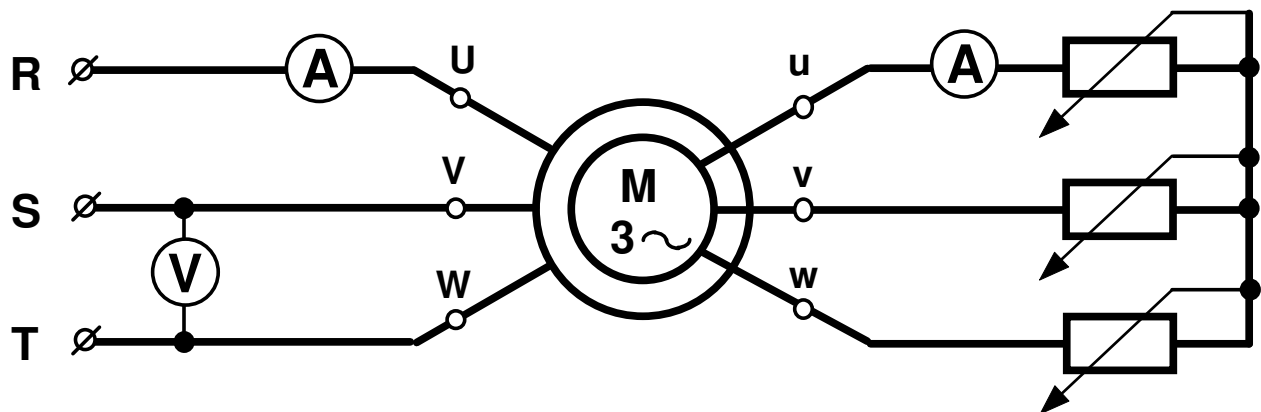


Fig. 4: Conexión de un motor de rotor bobinado

3.- MOTORES ASÍNCRONOS MONOFÁSICOS

3.1.- Motor monofásico simple

El *teorema de Leblanc* dice que un devanado recorrido por una corriente alterna monofásica crea un campo magnético *pulsante*, el cual equivale a dos campos magnéticos giratorios iguales que rotan en sentidos opuestos.

Un motor de jaula de ardilla cuyo estator posea un único devanado por el que circula una corriente alterna monofásica no podrá, según el teorema de Leblanc, arrancar por sí mismo, pues los dos campos magnéticos giratorios dan lugar a un par resultante nulo.

Si se consigue hacer girar a este motor a una velocidad n mediante un par externo, el deslizamiento s_d del campo giratorio directo (el que gira en el mismo sentido que el motor) vale

$$s_d = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1 - \frac{n}{n_1} = s \quad (4)$$

y el deslizamiento s_i del campo inverso (el que gira en sentido contrario al del eje del motor) vale

$$s_i = \frac{(-n_1) - n}{(-n_1)} = 1 + \frac{n}{n_1} = 2 - s \quad (5)$$

Las relaciones (4) y (5) indican que si se consigue hacer girar al motor a una velocidad n los deslizamientos de los dos campos giratorios no son iguales y el par resultante no será nulo. Por lo tanto, una vez arrancado, el motor sigue girando por sí mismo.

3.2.- Motores monofásicos de condensador

Los motores monofásicos de condensador poseen en su estator dos devanados desfasados entre sí 90° eléctricos en el espacio; uno de ellos se denomina *principal* y usualmente cubre los $2/3$ de las ranuras del estator y el otro se denomina *auxiliar* y cubre el resto del estator.

En serie con el devanado auxiliar se conecta un condensador de tal manera que las intensidades que circulen por ambos devanados queden desfasadas 90° en el tiempo y sus módulos sean iguales (Figs. 5 y 6).

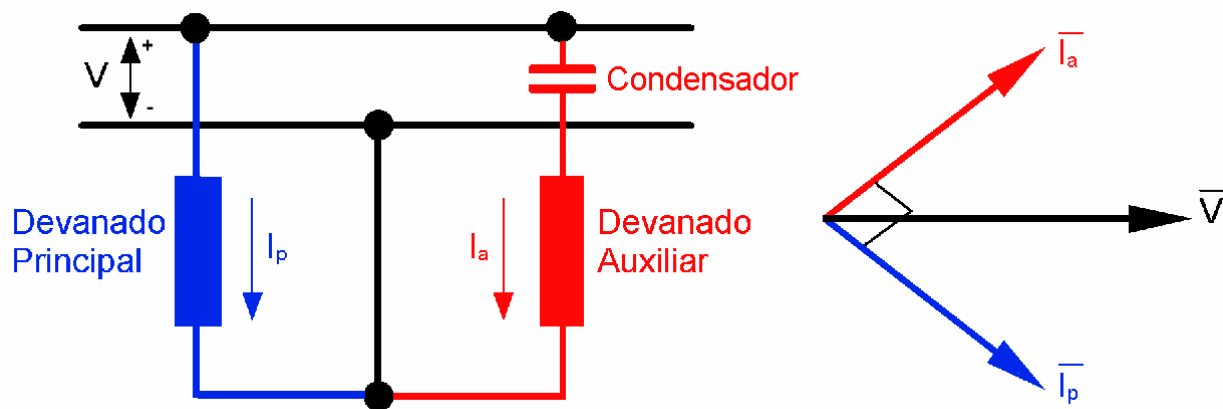


Fig. 5: Principio de funcionamiento de un motor monofásico de condensador

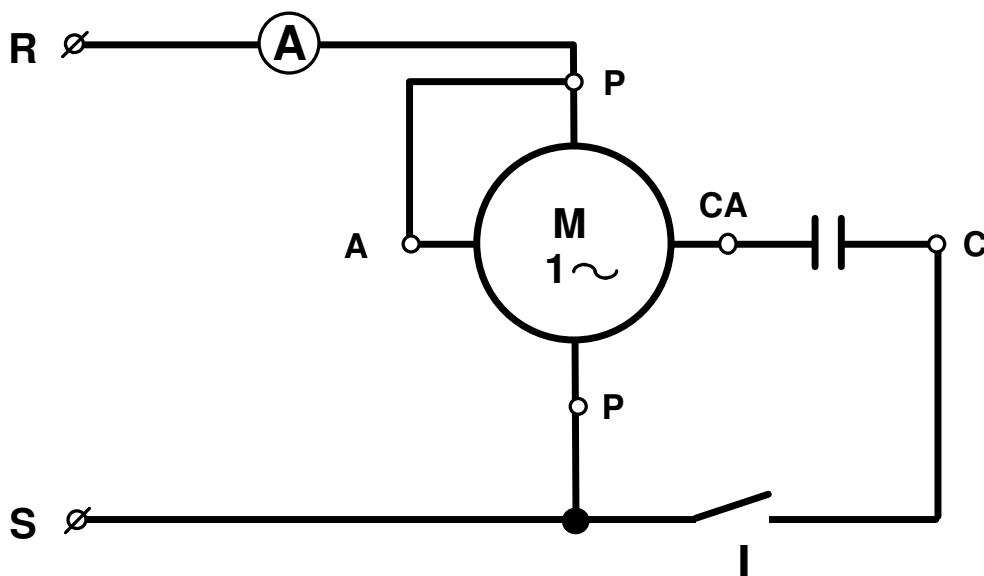
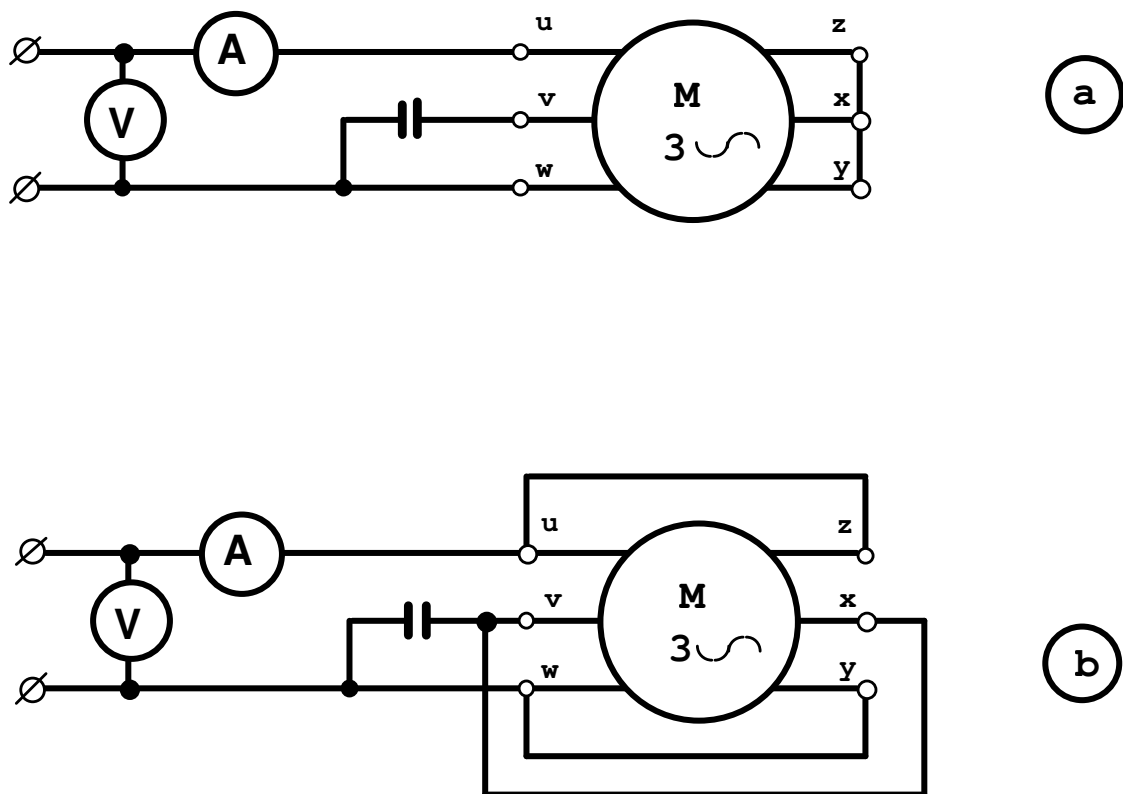


Fig. 6: Conexión de un motor monofásico de condensador

Al circular unas corrientes de iguales valores eficaces y desfasadas entre sí 90° en el tiempo por unos devanados desfasados 90° eléctricos en el espacio se genera un campo magnético giratorio circular que hace girar al motor.

Una vez arrancado el motor, se puede desconectar el devanado auxiliar y el motor seguirá funcionando como monofásico simple o se le puede dejar con el condensador y el devanado auxiliar conectados. En este último caso hay que dimensionar el condensador y el devanado auxiliar para que puedan funcionar conectados a la red no sólo durante el arranque, sino de forma permanente.

4.-CONEXIÓN DE UN MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO A UNA RED MONOFÁSICA. CONEXIÓN STEINMETZ



*Fig. 7: Conexión Steinmetz para un motor de 400/230 V:
(a) en una red de 400 V
(b) en una red de 230 V.*

Si un motor de inducción trifásico con el rotor parado se conecta a una red monofásica, el motor no arranca por sí mismo y consume una corriente elevada que acaba por averiarlo. Esto se debe a que el campo magnético que genera el estator ya no es giratorio, sino pulsante, como en un motor monofásico simple.

Se puede conseguir que un motor trifásico funcione en una red monofásica si se le hace funcionar como si fuera un motor monofásico de condensador mediante la conexión Steinmetz (Fig. 7). Para ello se conectan las tres fases del estator en estrella o en triángulo, de acuerdo con el valor de la tensión de la red monofásica, y los extremos U, V y W (o U_1 , V_1 y W_1 , según la nueva nomenclatura de los bornes de máquinas eléctricas) de las fases del motor se conectan a la red así:

- Dos de estos extremos se conectan a los dos conductores de la red monofásica.
- El tercer extremo de las fases del motor se conecta a uno cualquiera de los conductores de la red monofásica a través de un condensador.

De esta manera se consigue que entre las corrientes de las tres fases del motor exista un cierto desfase, lo cual origina un campo giratorio. Este campo no es circular, sino elíptico, pero basta para que el motor gire. De todos modos, un motor conectado de esta manera (conexión Steinmetz) no tiene un reparto idóneo de campo magnético y corrientes y no se le puede exigir una potencia superior a un 70% de la nominal.

La figura 7 representa la conexión Steinmetz para un motor de 400/230 V. En la figura 7a el motor se conecta en estrella, pues la tensión de la red es de 400 V, y en la figura 7b se conecta en triángulo, pues la red tiene una tensión de línea de 230 V.

Las normas DIN recomiendan utilizar condensadores de papel metalizado, con una capacidad -en redes de 220 V- de 70 microfaradios por kilovatio de potencia útil del motor ($22 \mu\text{F}/\text{kW}$ para redes de 380 V y $200 \mu\text{F}/\text{kW}$ en redes de 125 V) y cuya tensión nominal sea igual o superior a 1'25 veces el valor máximo de la tensión de la red monofásica.

5.- CURVA DEL PAR DE UN MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO

La curva del par de un motor asíncrono alimentado por un sistema trifásico de tensiones de valor eficaz y de frecuencia constantes, cuyo devanado estatórico genera un campo magnético giratorio perfectamente circular y que no tiene pérdidas mecánicas es la representada en la curva a de la figura 8.

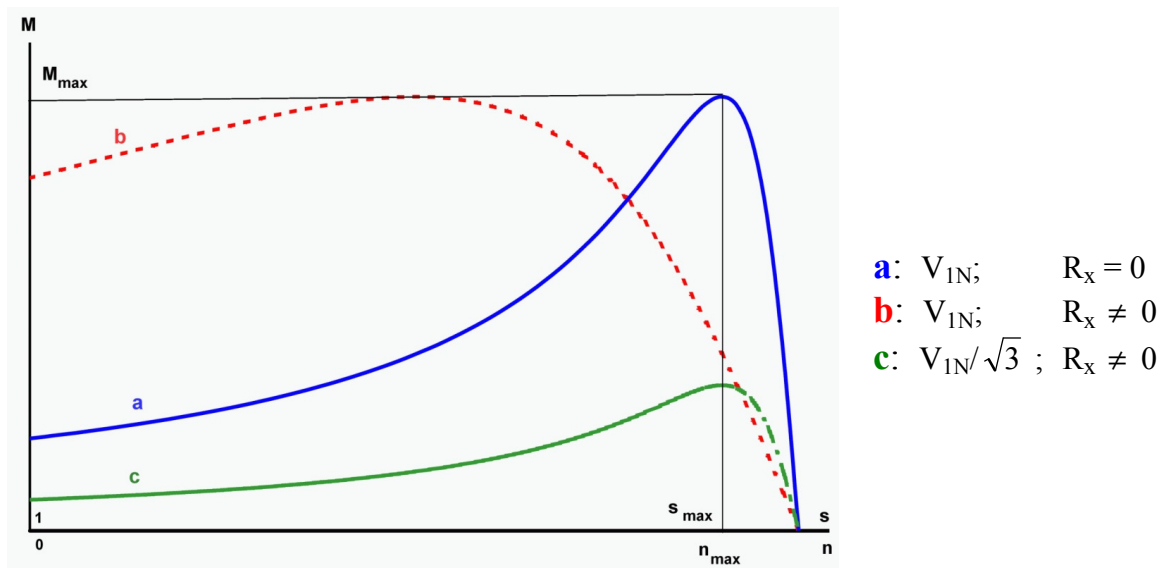


Fig. 8: Curva del par de un motor trifásico de inducción

Si la tensión de alimentación disminuye (curva c de la Fig. 8), el par máximo que puede suministrar la máquina disminuye, pero no varía la velocidad a la que el motor proporciona dicho par máximo.

Si se conecta una resistencia en serie con cada fase del rotor, el valor del par máximo no varía, pero disminuye la velocidad en la que la máquina suministra dicho par máximo (curva b de la Fig. 8).

Para tener en cuenta las pérdidas mecánicas de la máquina hay que restar al par representado en las curvas de la Fig. 8 el par de frenado producido por dichas pérdidas. Por este motivo, una máquina real, con pérdidas mecánicas, gira a una velocidad ligeramente inferior a la de sincronismo (n_1) cuando está en vacío; es decir, cuando proporciona un par útil nulo.

Para obtener experimentalmente la curva de par de un motor asíncrono se acopla su eje al de una máquina que ejerza un par resistente que se pueda regular a voluntad.

Se puede utilizar para este fin un freno dinamométrico, que es un generador de c.c. de excitación independiente cuya carcasa es basculante. En virtud del principio de acción y reacción el par que se ejerce sobre el eje es el mismo -cambiado de signo- que el que se ejerce sobre la carcasa. El par sobre la carcasa se puede medir fácilmente mediante un dinamómetro, mediante galgas extensiométricas, etc. Por otra parte, regulando la carga eléctrica (una resistencia variable) alimentada por este generador se controla el par de frenado. En la Fig. 9 se muestra el esquema de conexiones de un freno dinamométrico.

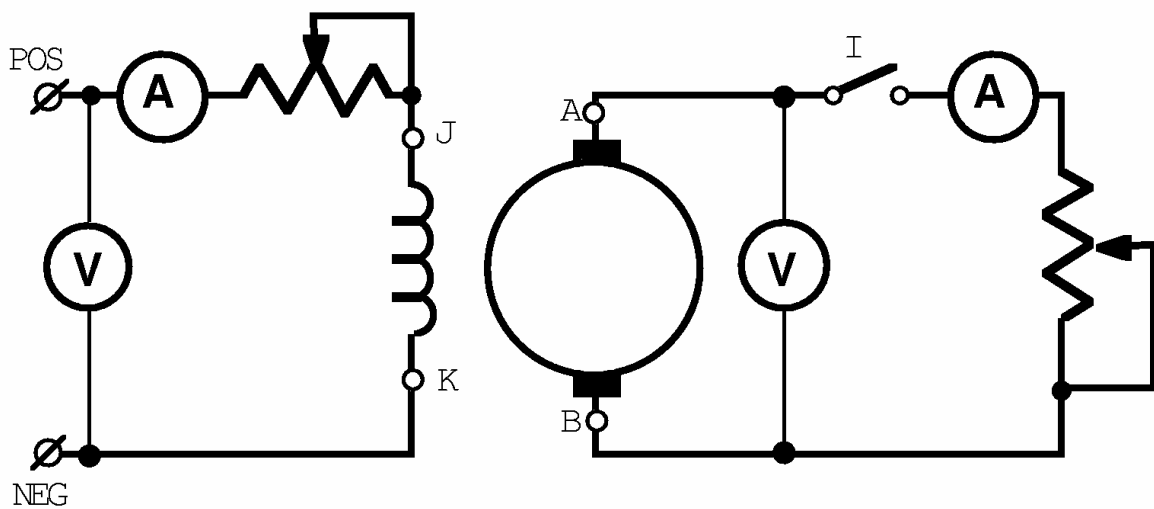


Fig. 9: Esquema de conexiones de un freno dinamométrico

ANEXO:

**CURVAS PAR-VELOCIDAD DE UN MOTOR ASÍNCRONO DE ROTOR BOBINADO
OBTENIDAS EXPERIMENTALMENTE EN EL LABORATORIO**

