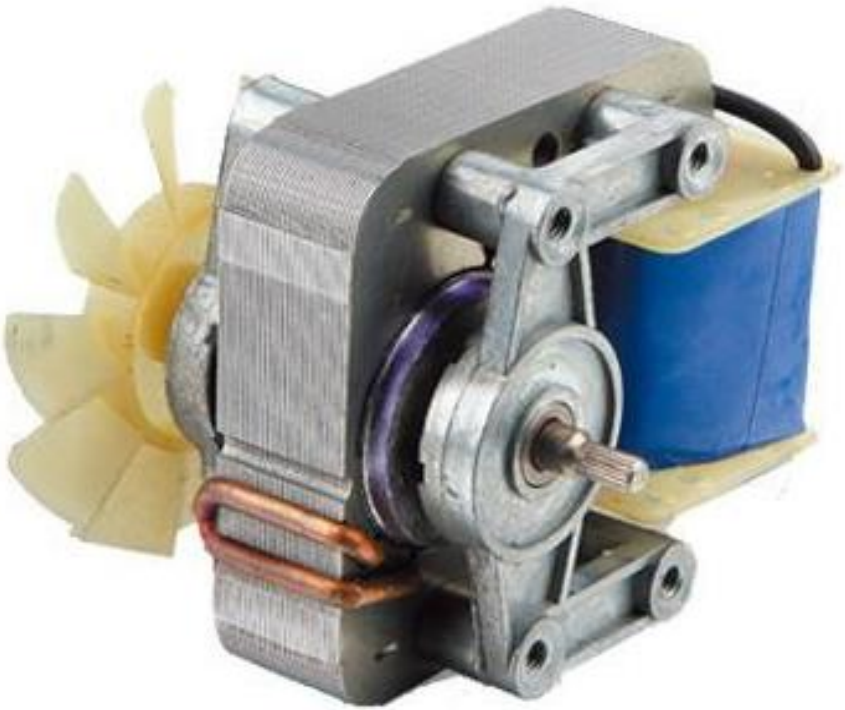
Javier Pereda
Profesor
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Pontificia Universidad Católica de Chile



IEE 2213
Máquinas Eléctricas

9. Máquinas Monofásicas

Características y aplicaciones; principio de funcionamiento; clasificación; motor de inducción jaula de ardilla (fase partida resistiva y capacitiva, espira sombra y reluctancia); motor universal; motor de repulsión; motor síncrono de histéresis y reluctancia; motores trifásicos alimentado con fuentes monofásicas o dc a través de electrónica.

V.2018

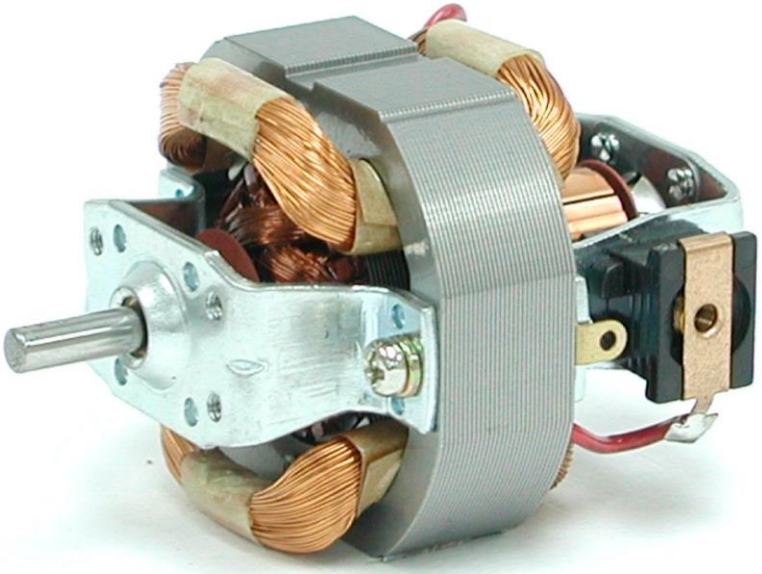
Parte de esta lectura está basada en la lectura del Profesor Juan Dixon

Máquinas Monofásicas
Características y Aplicaciones

- Se alimentan de solo una fase (fase-neutro)
- Son ampliamente utilizados en el hogar, tiendas y oficinas
- Generalmente se utilizan como motores, no como generadores
- Son más ineficientes que los motores trifásicos
- Son de bajas potencias

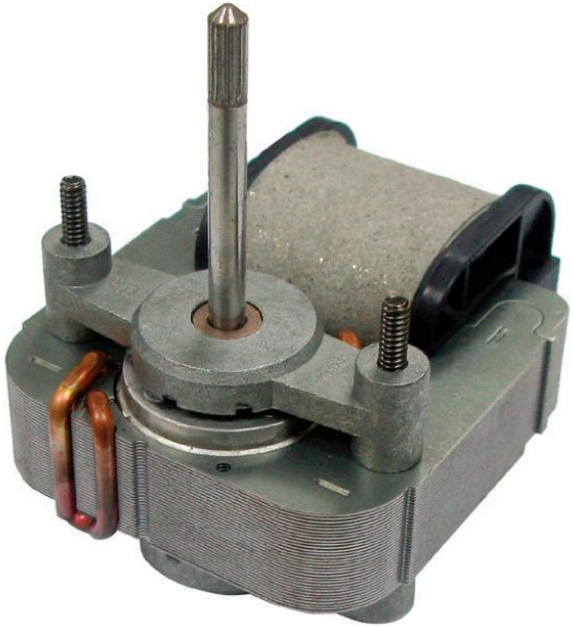
Máquinas Monofásicas

Características y Aplicaciones

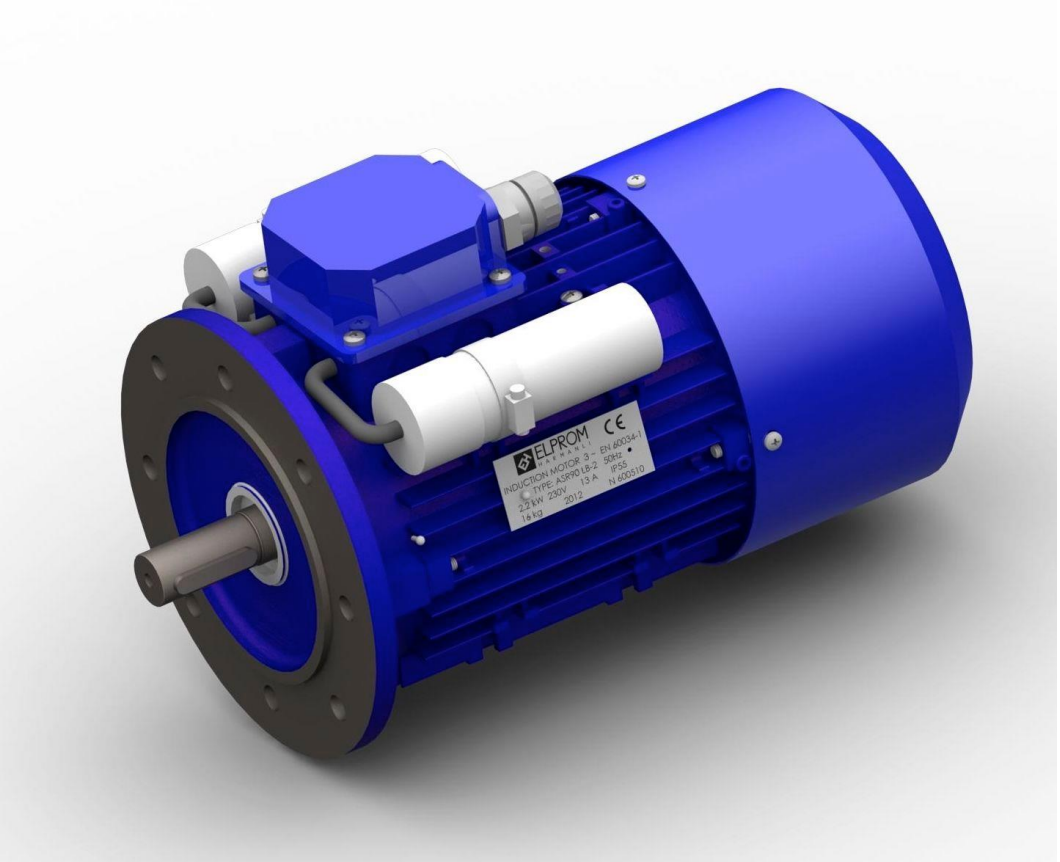








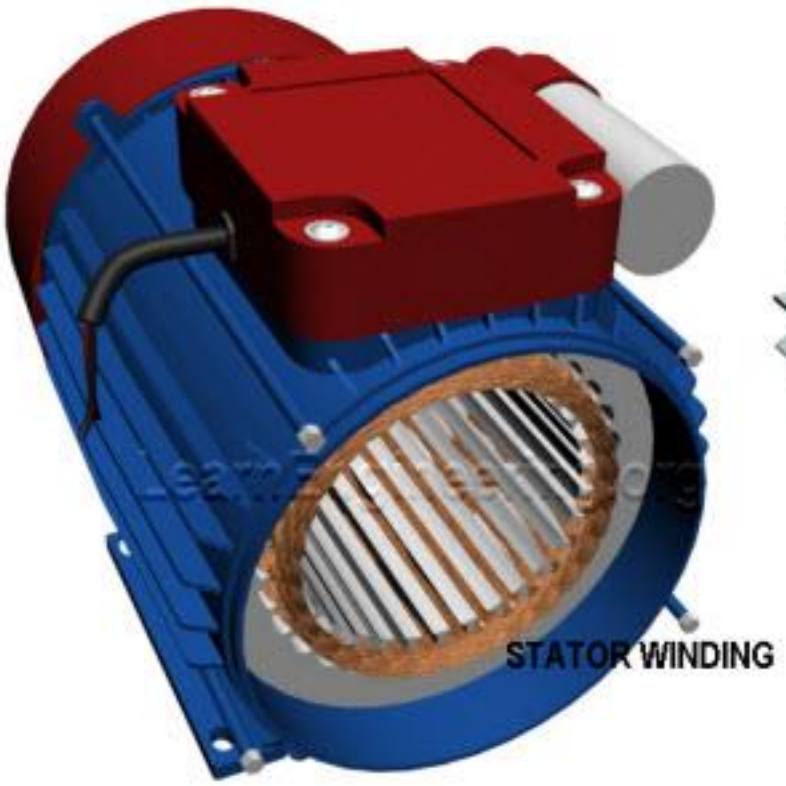
Máquinas Monofásicas
Características y Aplicaciones

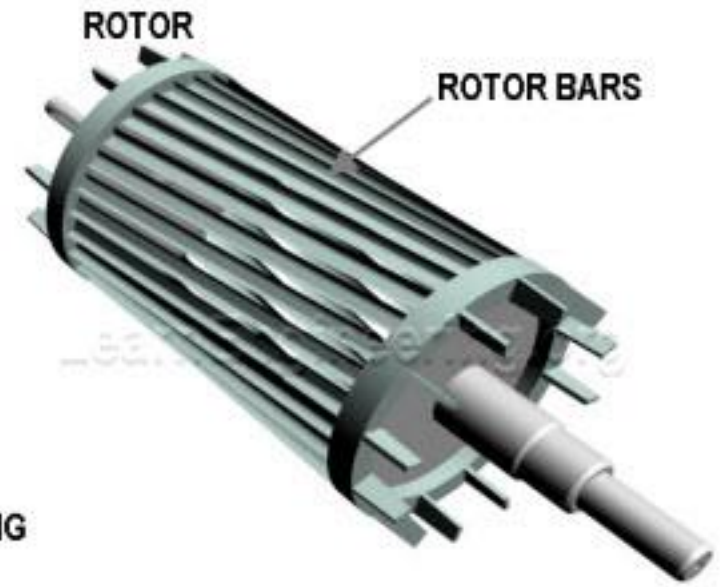




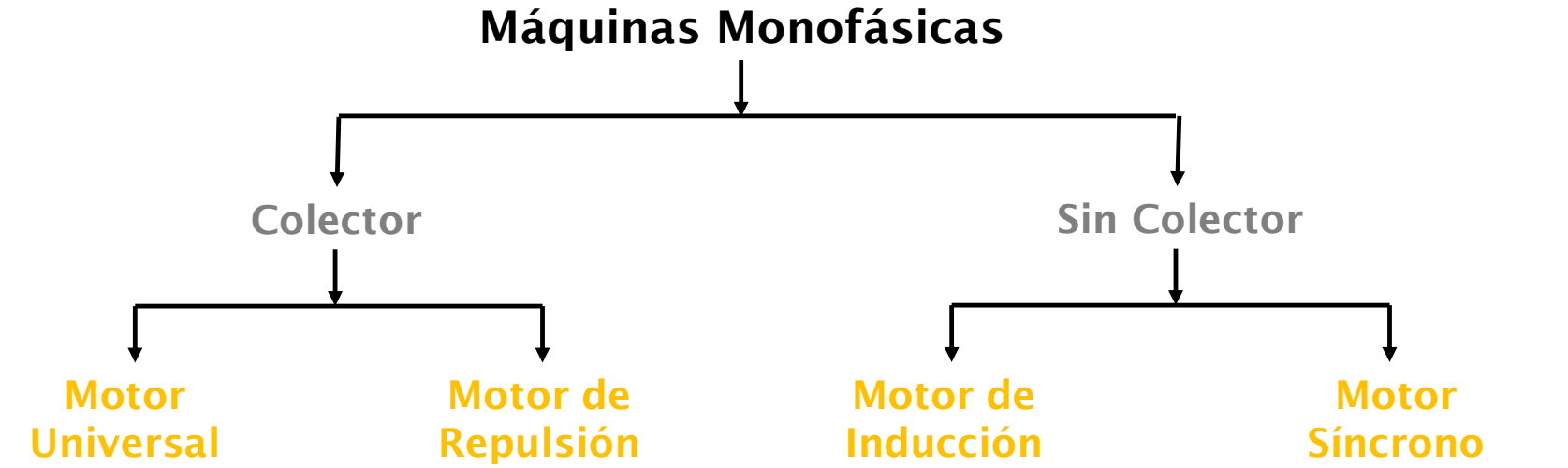


Máquinas Monofásicas
Características y Aplicaciones





Máquinas Monofásicas
Clasificación



Motor de Inducción Jaula de ardilla

Características

Se verá más adelante que para estos motores es deseable una resistencia rotórica baja y no tiene sentido aumentarla en la partida, por lo tanto el motor de rotor bobinado monofásico no es práctico.

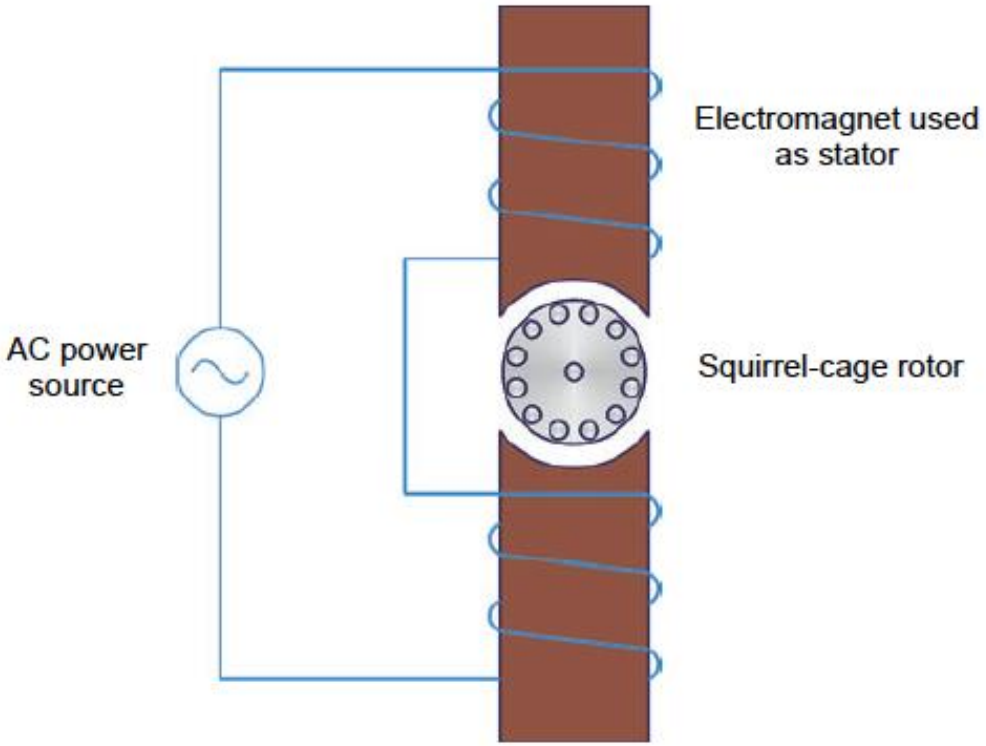
El motor de inducción monofásico no tiene torque de partida, por lo tanto requiere métodos de partidas:

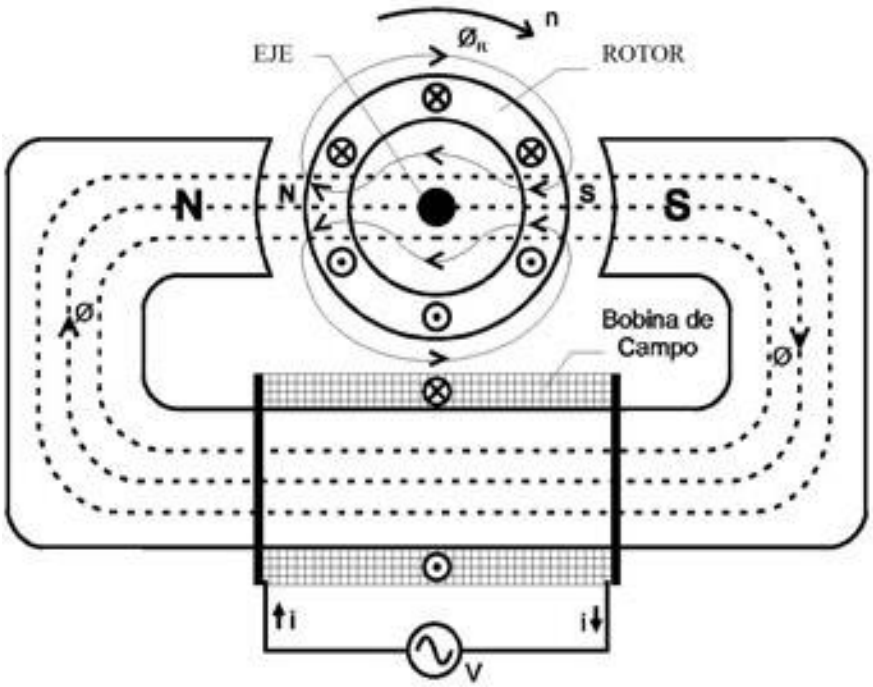
- **Motor fase-partida (split-phase) Resistivo**
- **Motor fase-partida (split-phase) Capacitivo**
- **Motor espira sombra**
- **Motor de reluctancia (en realidad es un motor síncrono)**

Motor de Inducción Jaula de ardilla

Características

El flujo generado por el estator es de magnitud sinusoidal pero su dirección es siempre la misma (flujo pulsante).



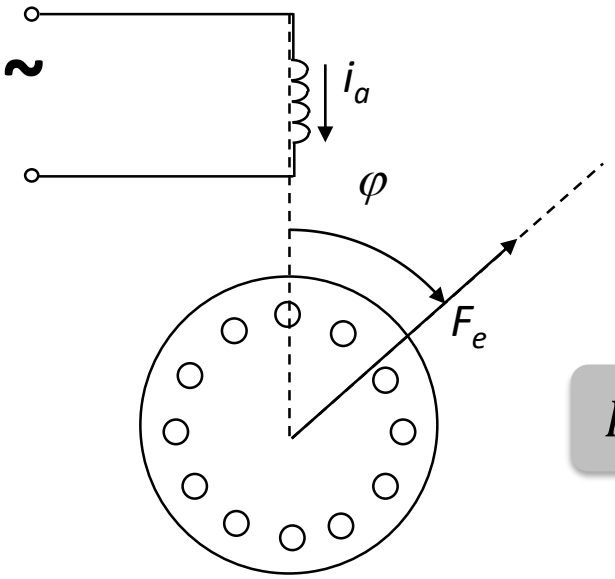


Motor de Inducción Jaula de ardilla

Distribución de la FMM

El flujo en el entrehierro busca el camino más corto (menor reluctancia) y por lo tanto veremos que la fuerza magneto-motriz F_e se distribuye homogéneamente en el entrehierro si rotor y estator son cilíndricos.

Sin embargo, en los motores monofásicos la distribución no es tan homogénea y la magnitud de $\boldsymbol{F_e}$ dependerá del ángulo φ respecto a la bobina que genera el flujo en el estator:



$$i_a = I_m \cdot \cos \omega t$$

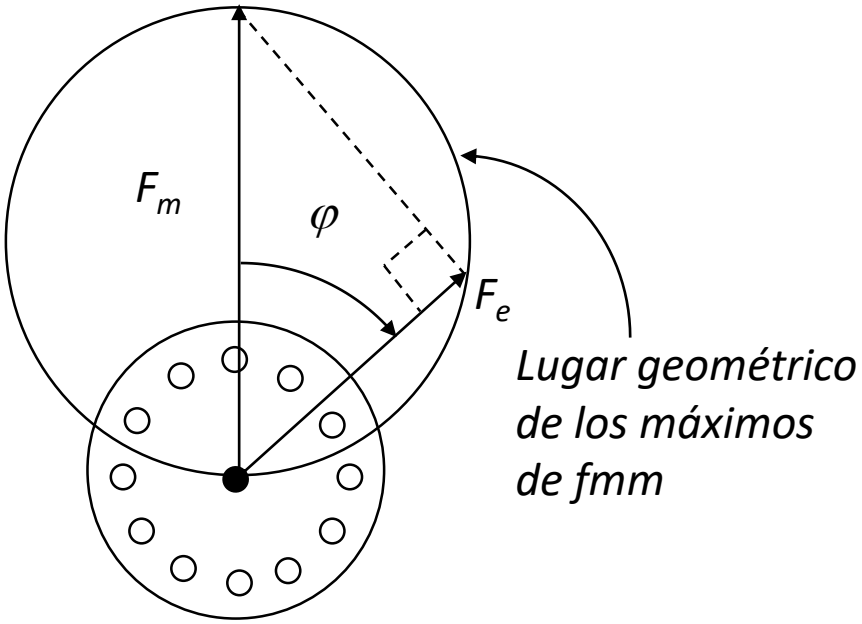
$$F_e = N \cdot i_a \cdot \cos \varphi$$

$$F_e = N \cdot I_m \cos \omega t \cos \varphi = F_m \cos \omega t \cos \varphi$$

Motor de Inducción Jaula de ardilla

Distribución de la FMM

La ecuación de F_e resultante representa una fmm pulsante, de magnitud máxima dependiente de la posición arbitraria del punto elegido φ. La magnitud máxima se alcanza en cada punto en el mismo instante.



$$F_e = F_m \cos \omega t \cos \varphi$$

Para *t=0*: $\omega t = 0$

$$F_e = F_m \cos \varphi$$

Motor de Inducción Jaula de ardilla

Distribución de la FMM

Si desarrollamos el producto de cosenos anterior utilizando prostaféresis y luego una identidad trigonométrica tendremos:

$$F_e = F_m \cos \omega t \cos \varphi$$

$$F_e = \frac{1}{2} F_m \cos(\varphi - \omega t) + \frac{1}{2} F_m \cos(\varphi + \omega t)$$

Esta ecuación representa dos ondas viajeras (CMR) de igual velocidad pero sentidos opuestos con simetría respecto al ángulo φ de la bobina que genera el flujo.

$$F_e = F_e^+ + F_e^- = F_T$$

F_e^+: campo que gira en el sentido del rotor.
F_e^-: campo contrario al rotor.

Motor de Inducción Jaula de ardilla

Distribución de la FMM

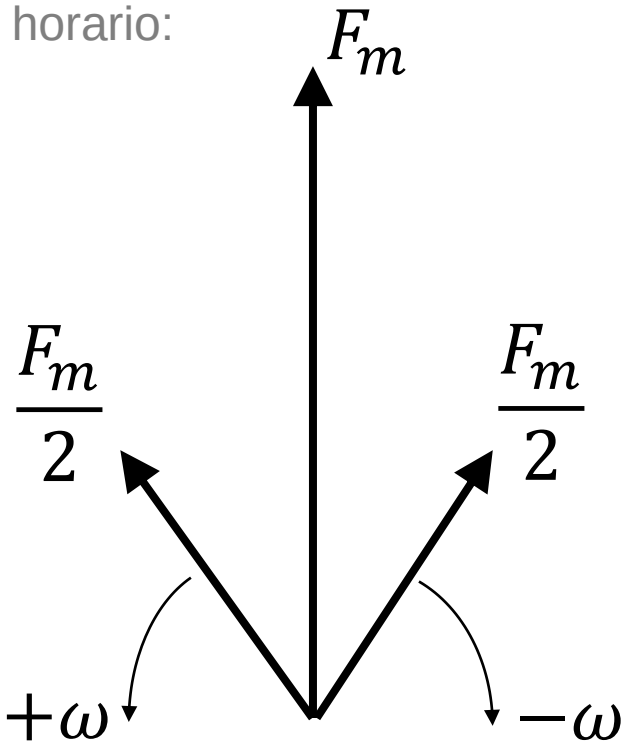
Si definimos de forma arbitraria cual torque es horario:

$$F_e^+ = \frac{1}{2} F_m \cos(\varphi - \omega t)$$

$$F_e^- = \frac{1}{2} F_m \cos(\varphi + \omega t)$$

$$T^+ = F_e^+ F_r^+ \sin \delta_{er}^+$$

$$T^- = F_e^- F_r^- \sin \delta_{er}^-$$

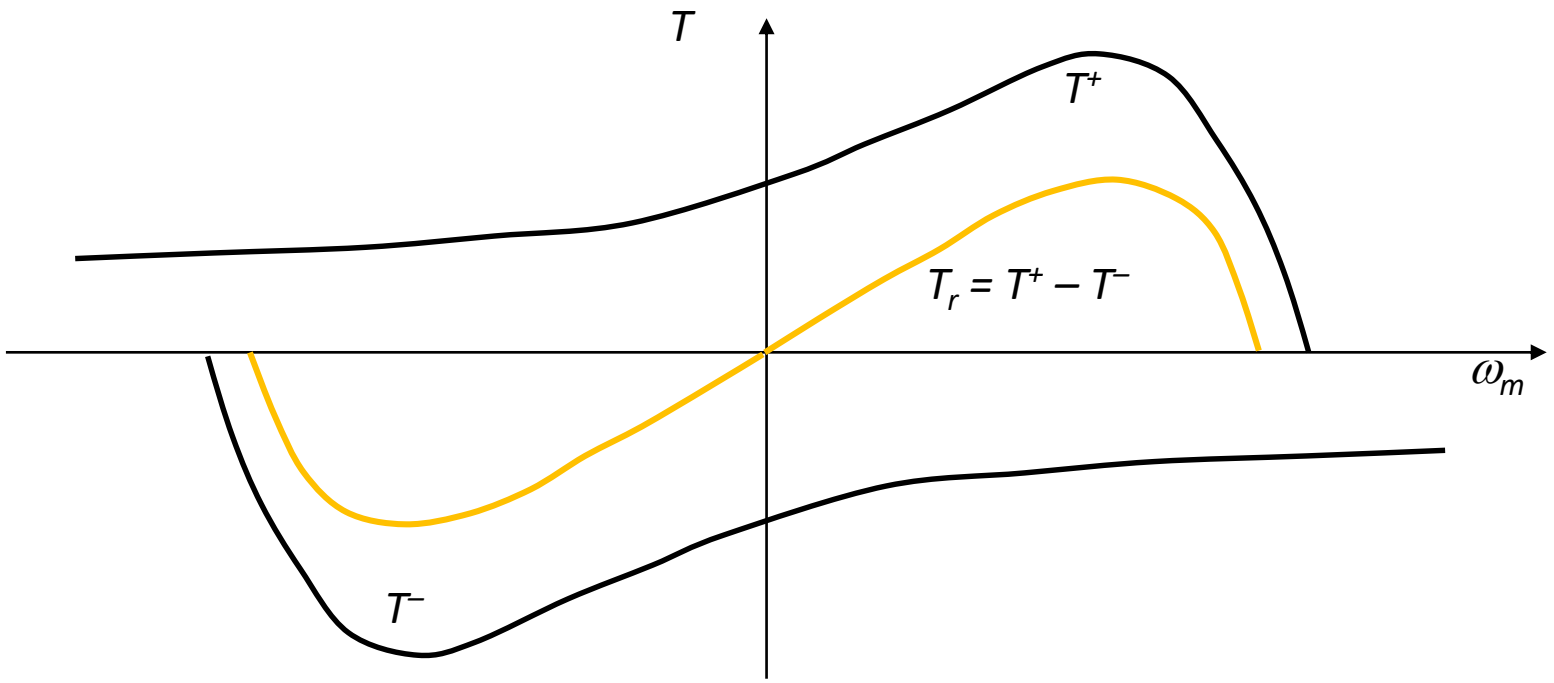


Ambos torques son idénticos en magnitud e interactúan superpuestos, uno independiente del otro. Cada torque es generado por un CMR y su característica es idéntica a la del motor de inducción trifásico.

Motor de Inducción Jaula de ardilla

Curva característica de Torque-velocidad

La característica de torque será generada por la acción combinada de ambos campos rotatorios. Considerando que se trata de un motor de inducción, su análisis nos lleva a curvas T-ω_m del tipo ya conocidas.



Motor de Inducción Jaula de ardilla

Características

La curva T-ω_m de este motor monofásico tiene las siguientes características:

i. Torque de arranque nulo.

ii. Sentido de giro definido por impulso inicial.

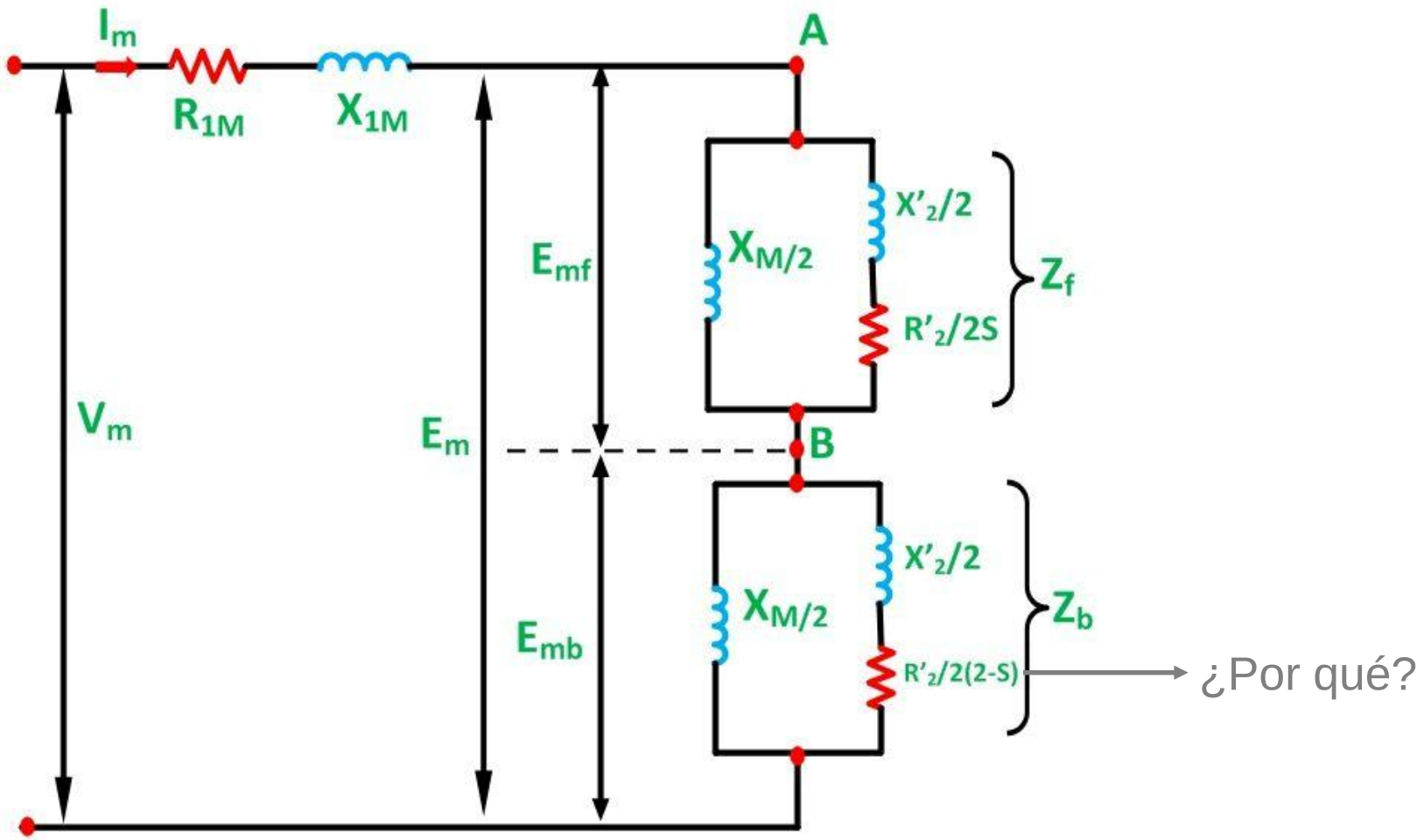
iii. Velocidad en vacío (T_e=0) inferior a la síncrona.

iv. Se requiere de baja resistencia rotórica para buenas características de operación*.

*El motor de inducción monofásico de rotor bobinado no tiene sentido práctico.

Motor de Inducción Jaula de ardilla

Circuito equivalente



Motor de Inducción Jaula de ardilla

Métodos de partida

El motor de inducción monofásico no tiene torque de partida, por lo tanto requiere métodos de partidas:

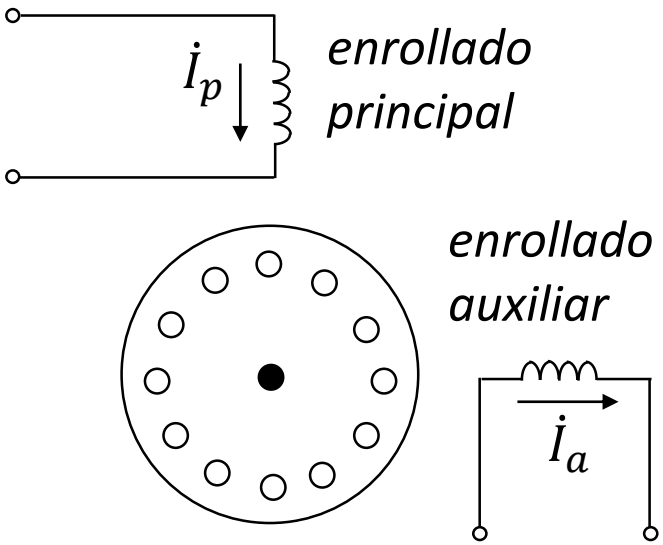
- **MI fase-partida (split-phase) Resistivo**
- **MI fase-partida (split-phase) Capacitivo**
- **MI espira sombra**
- **MI con reluctancia (cabeza polar asimétrica para generar entrehierro no uniforme)**

Motor de Inducción Jaula de ardilla

Métodos de partida

Motor fase-partida (split-phase)

El principio es tratar de generar un motor bifásico, ojalá con enrollados en cuadratura (90º), para generar un CMR pero a través de una alimentación monofásica.



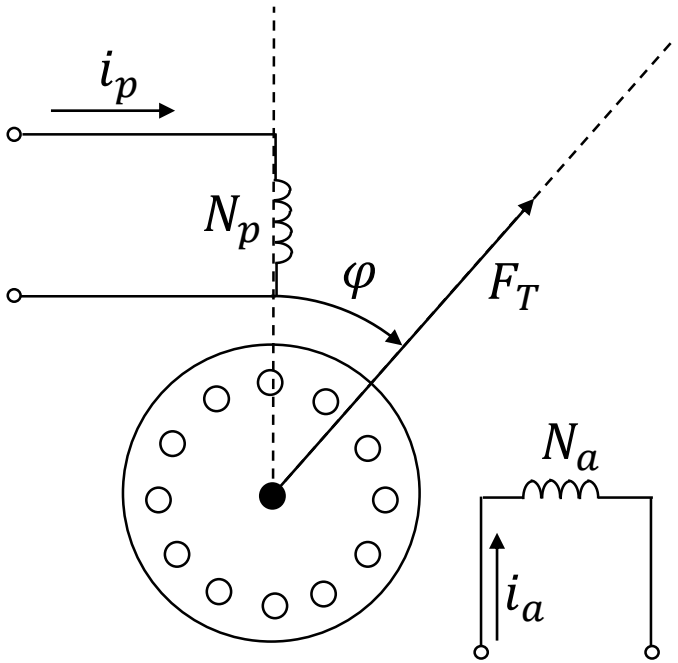
$$\dot{I}_p = I_p \angle 0°$$

$$\dot{I}_a = I_a \angle \theta$$

Motor de Inducción Jaula de ardilla

Métodos de partida

Motor fase-partida (split-phase)



$$i_p = I_m^p \cos \omega t$$
$$i_a = I_m^a \cos(\omega t + \theta)$$

$$F_T = F_p + F_a$$

$$F_p = N_p i_p \cos \varphi$$
$$F_a = N_a i_a \sin \varphi$$

$$\therefore F_T = N_p I_m^p \cos \varphi \cos \omega t + N_a I_m^a \sin \varphi \underbrace{\cos(\omega t + \theta)}_{\cos\theta \cos \omega t - \sin\theta \sin \omega t}$$

$$F_T = F_m^p \cos \varphi \cos \omega t + F_m^a \sin \varphi \cos \theta \cos \omega t - F_m^a \sin \varphi \sin \theta \sin \omega t$$

Motor de Inducción Jaula de ardilla

Métodos de partida

Motor fase-partida (split-phase)

Si $\theta = 0^o$:

$$F_T = \left(F_m^p \cos\varphi + F_m^a \sin\varphi\right)\cos\omega t$$

La ecuación que representa un campo pulsante.

Si $\theta \neq 0^o$ aparece un campo rotatorio superpuesto al campo pulsante.
El óptimo se produce cuando $\theta = 90^o$.

Si $\theta = 90^o$:

$$F_T = F_m^p \cos\omega t \cos\varphi - F_m^a \sin\omega t \sin\varphi$$

Sea:

$$F_m^p = F_m^a + F_{res} > F_m^a$$

$$\cos(\theta + \omega t) = \cos\theta\cos\omega t - \sin\theta\sin\omega t$$

Resulta:

$$F_T = \underbrace{F_{res}\cos\omega t\cos\varphi}_{\text{campo pulsante}} - \underbrace{F_m^a\cos(\omega t + \varphi)}_{\text{campo rotatorio}}$$

El óptimo con $\theta = 90^o$ se produce cuando $F_m{}^p = F_m{}^a$, pues en tal caso, el campo pulsante desaparece ($F_{res} = 0$).

Motor de Inducción Jaula de ardilla

Métodos de partida

Motor fase-partida (split-phase)

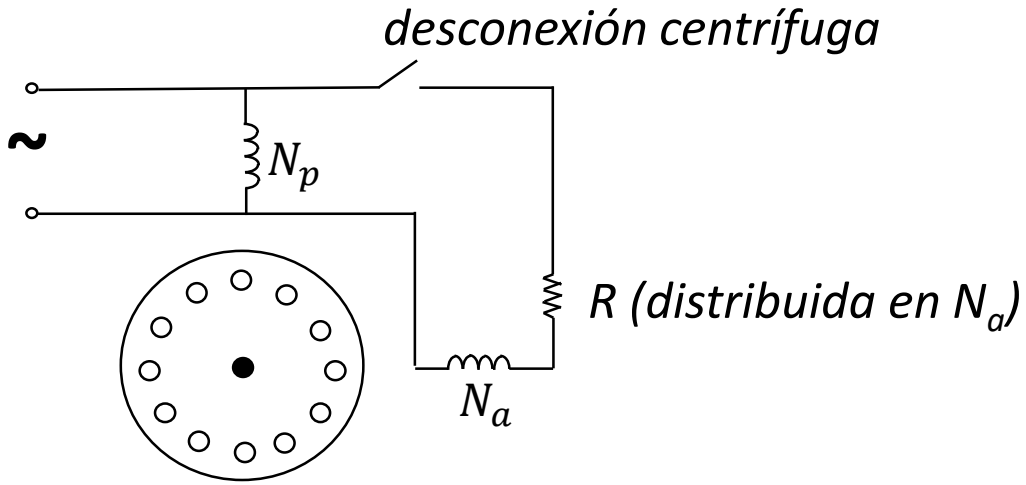
Como la alimentación es monofásica, para tener $\theta \neq 0^o$, las bobinas N_p y N_a no pueden ir conectadas en serie. Además, la relación *X/R* de sus impedancias debe ser diferente. Para lograr esto, se tienen los métodos de partida **resistivos** y **capacitivos**.

Motor de Inducción Jaula de ardilla

Métodos de partida

Motor fase-partida (split-phase) RESISTIVO

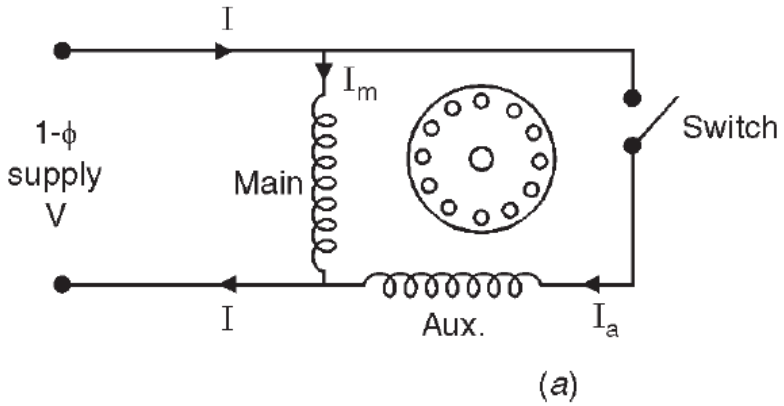
Este método de arranque es económico, pero se obtienen ángulos θ muy lejanos al óptimo ($\theta = 90^o$), con lo cual la componente rotatoria es pequeña con respecto a la pulsante. Esto implica un torque de arranque reducido.



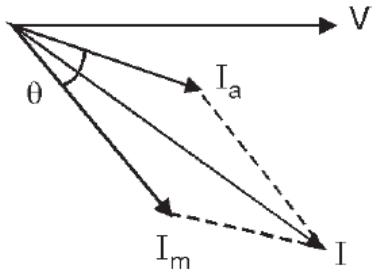
Motor de Inducción Jaula de ardilla

Métodos de partida

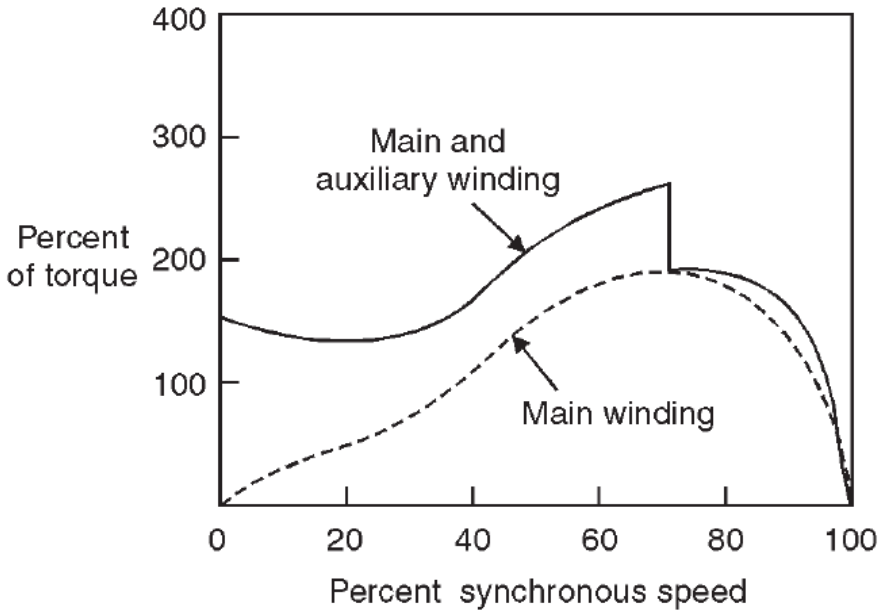
Motor fase-partida (split-phase)
RESISTIVO



(a)



(b)



(c)

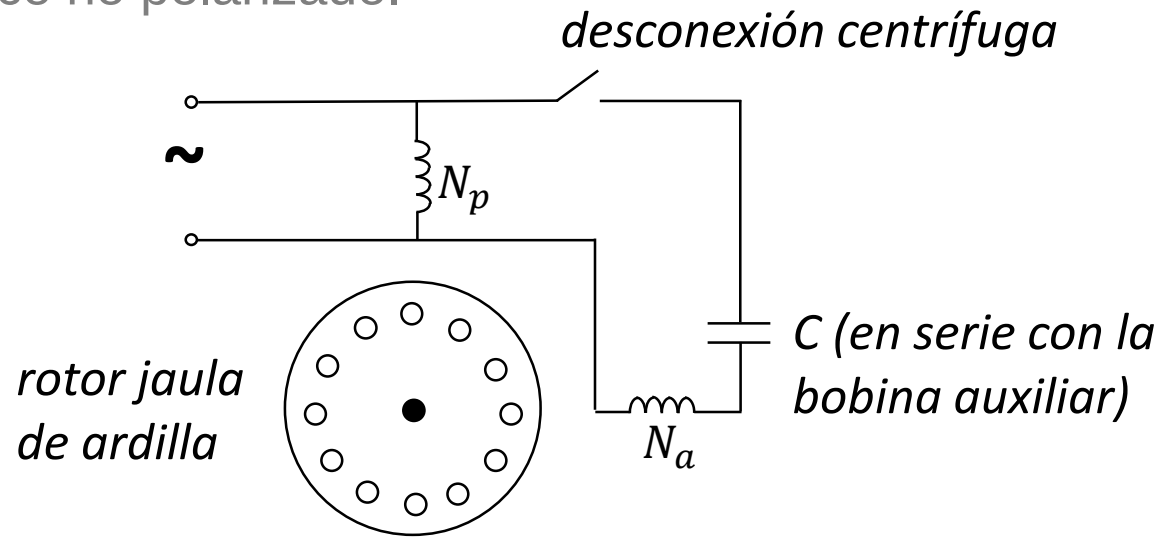
Motor de Inducción Jaula de ardilla

Métodos de partida

Motor fase-partida (split-phase) CAPACITIVO

El condensador puede ser permanente o de desconexión centrífuga o temporizada. Puede haber también uno permanente y otro de desconexión.

Como las capacidades requeridas pueden ser de algunas decenas o cientos de microfaradio, deben usarse condensadores del tipo electrolítico no polarizado.



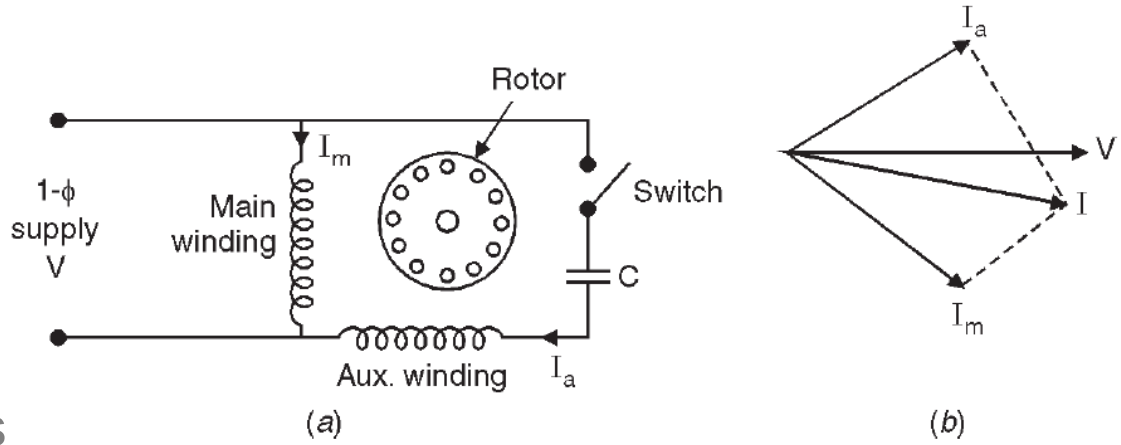
Motor de Inducción Jaula de ardilla

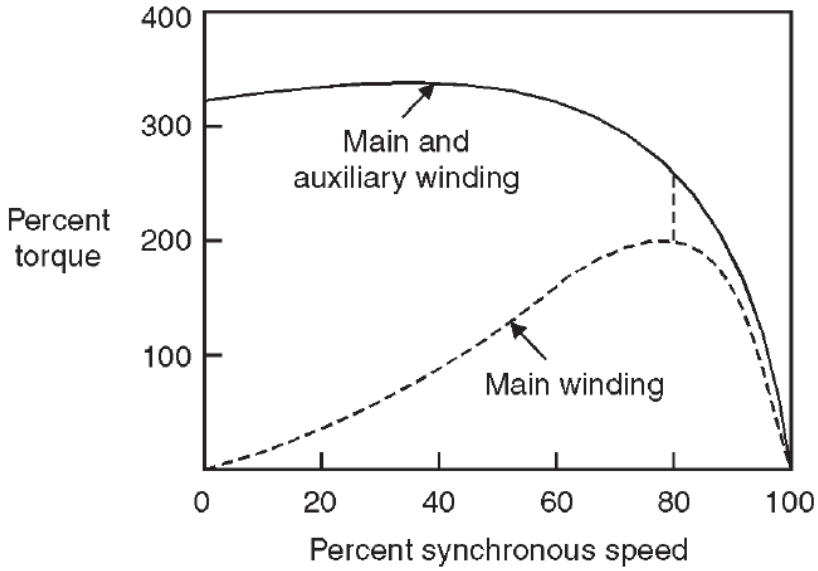
Métodos de partida

Motor fase-partida (split-phase) CAPACITIVO

La razón VAR requerida para el condensador es tal que, hasta el desarrollo de los condensadores electrolíticos AC en los años 30, el costo de los condensadores de partida era prohibitivo.

Note que el torque de partida es más alto, y la corriente de arranque más baja que los correspondientes al motor de fase partida resistivo.



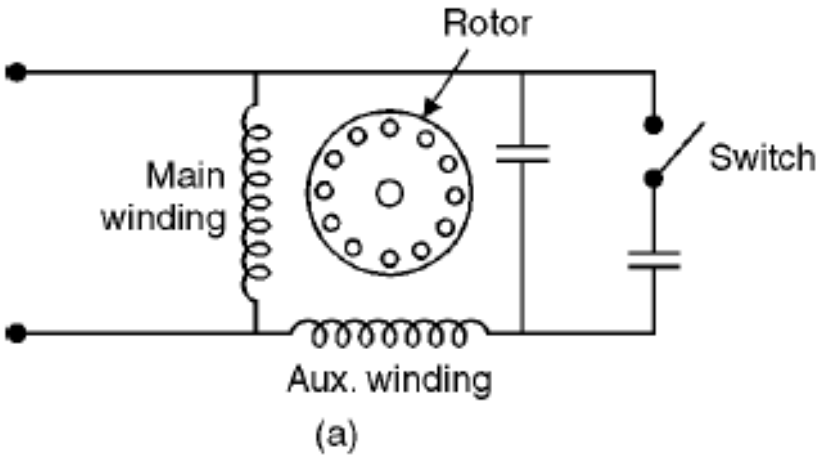


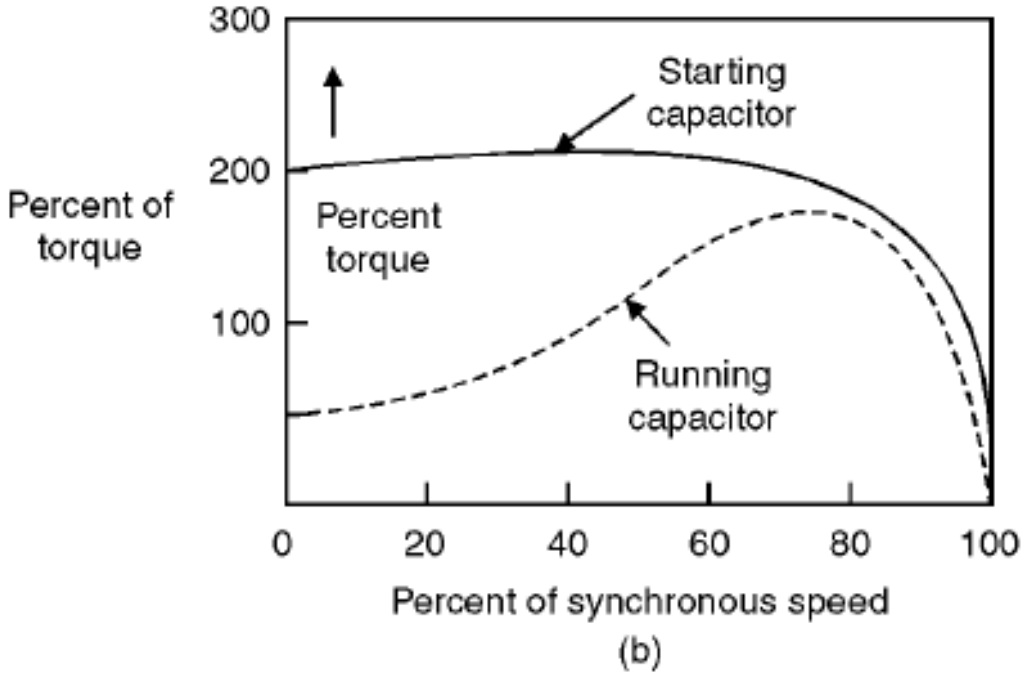
Motor de Inducción Jaula de ardilla

Métodos de partida

Motor fase-partida (split-phase) CAPACITIVO

También se pueden utilizar condensadores permanentes o uno de arranque y otro permanentes.

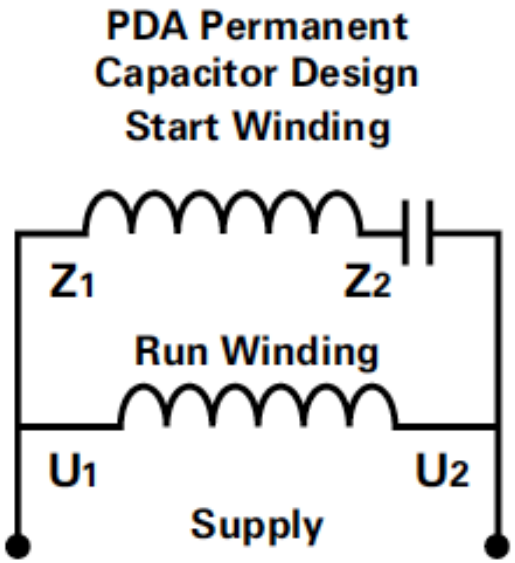




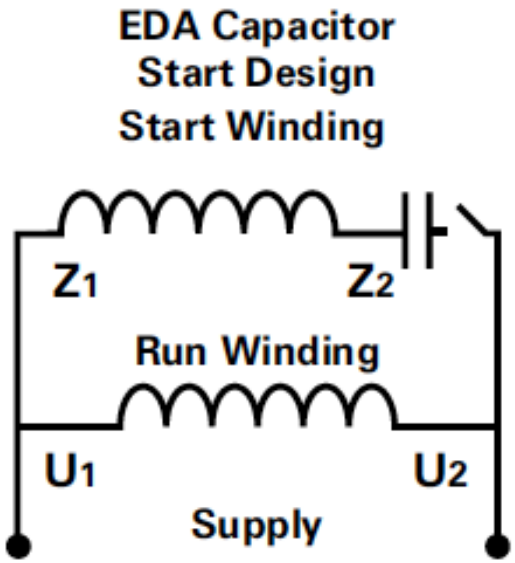
Motor de Inducción Jaula de ardilla

Métodos de partida

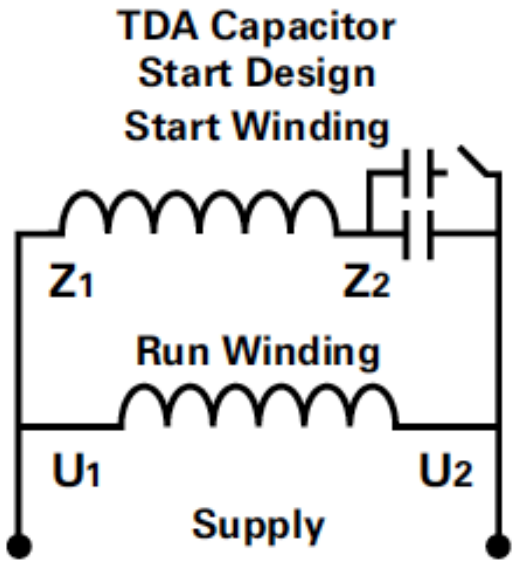
Motor fase-partida (split-phase) CAPACITIVO



Para cargas de **partida liviana** como ventiladores, sopladores, bombas o centrifugas (T de partida es **25-55%** del nominal).



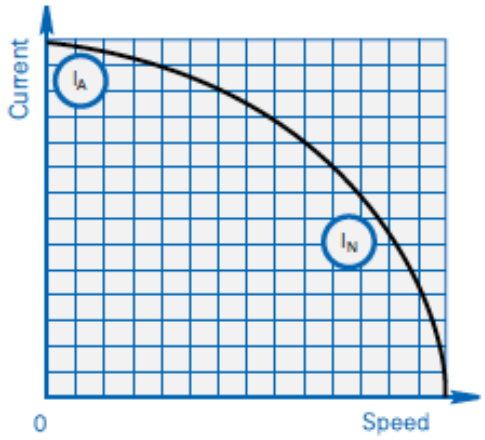
Para aplicaciones de mayor demanda (industrial o agrícola) con T de partida **160-300%** del nominal.



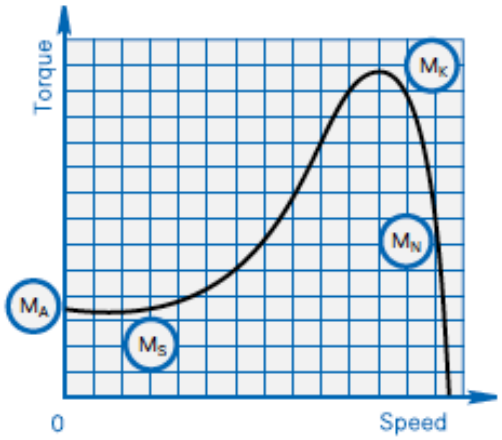
Para aplicaciones donde se parte bajo **las peores condiciones**.

Permanent capacitor DOL starting (BS EN 60034-12 Design N)

Typical speed/current curve



Typical speed/torque curve



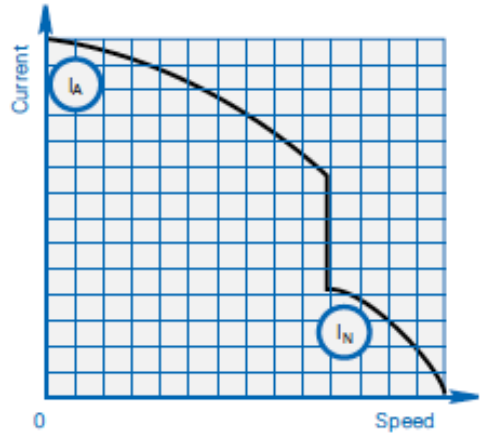
(I_A) Starting current
(I_N) Full load current
(M_A) Starting torque
(M_S) Pull up torque
(M_K) Pull out torque
(M_N) Full load torque

Torque/speed curves for specific motors can be supplied on request.

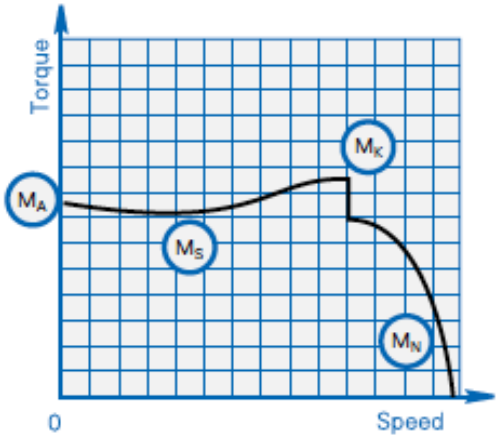
Performance figures are subject to IEC tolerances.

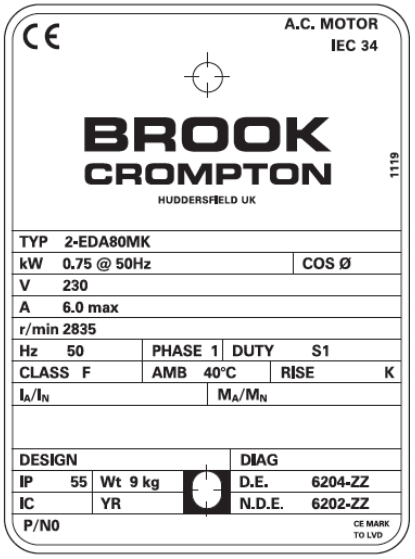
Capacitor start DOL starting (BS EN 60034-12 Design N)

Typical speed/current curve



Typical speed/torque curve





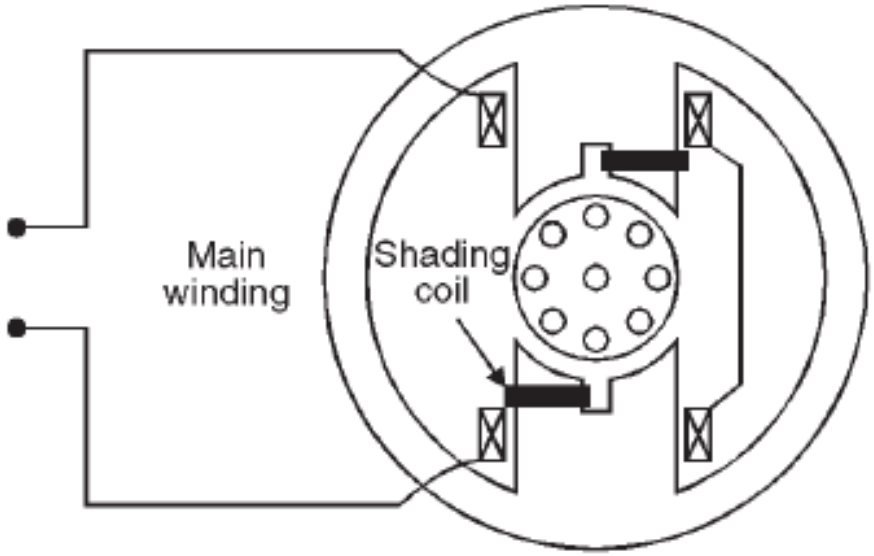
Example of rating plate

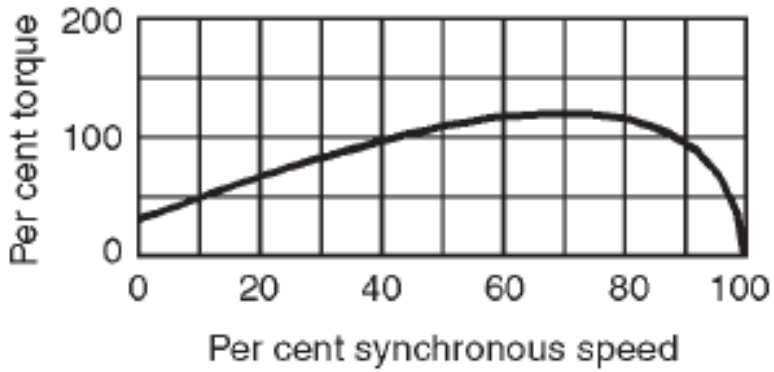
Motor de Inducción Jaula de ardilla

Métodos de partida

Motor con Espira Sombra

Se basa en la creación de un flujo inducido en una espira en cortocircuito, la cual enlaza parte de la cara polar del estator. Esta espira se opone a las variaciones de flujo, generando efectos contrarios cuando el flujo está subiendo y cuando está bajando.



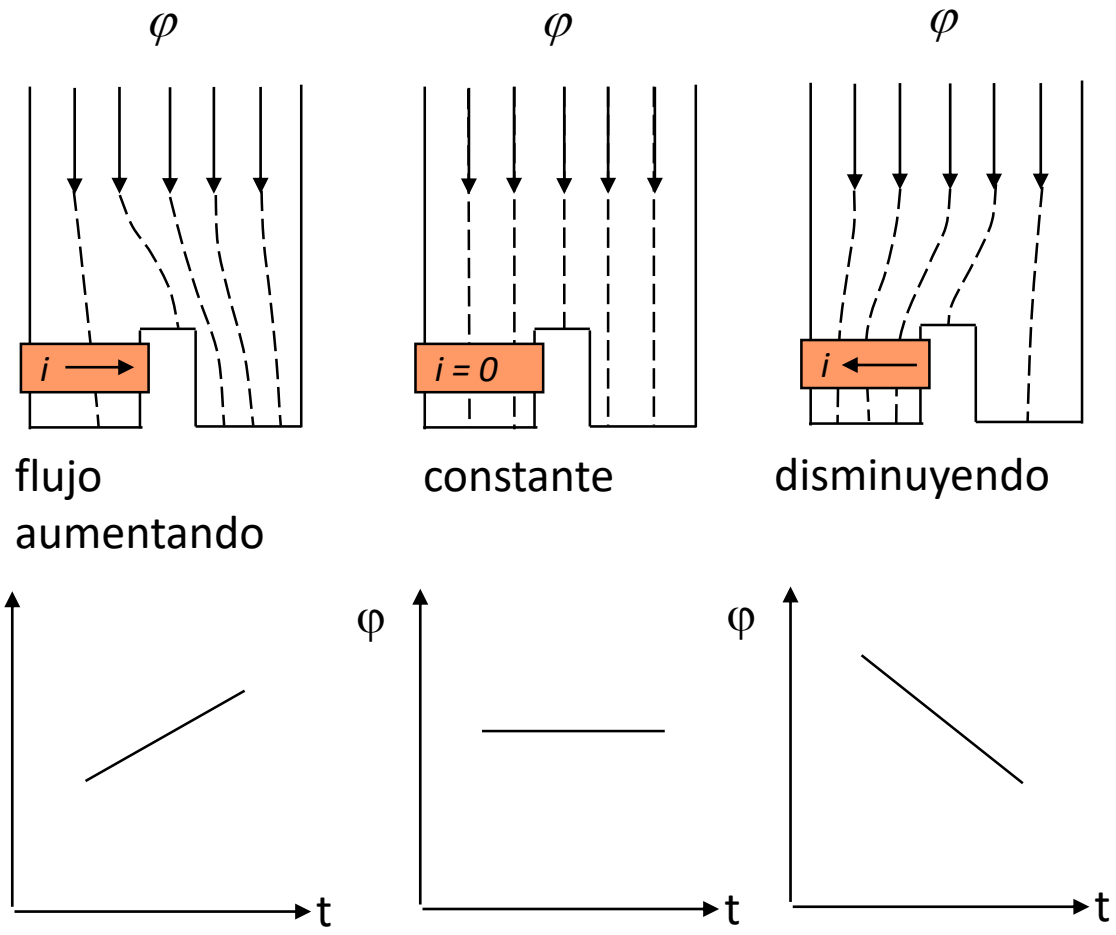


Motor de Inducción Jaula de ardilla

Métodos de partida

Motor con Espira Sombra

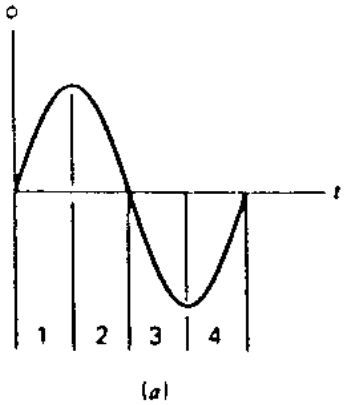
Este fenómeno permite crear una componente rotatoria en el campo pulsante.



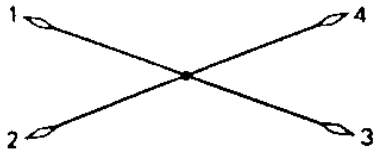
Motor de Inducción Jaula de ardilla

Métodos de partida

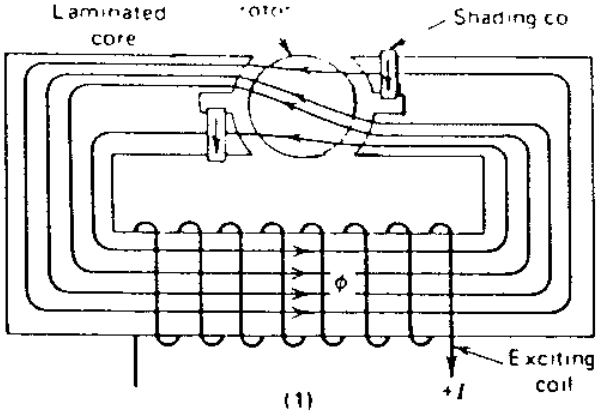
Motor con Espira Sombra



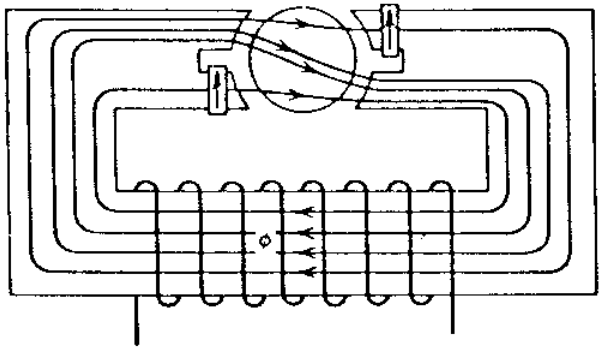
(a)



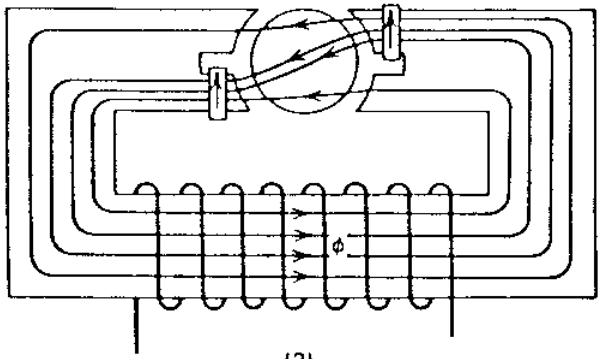
(b)



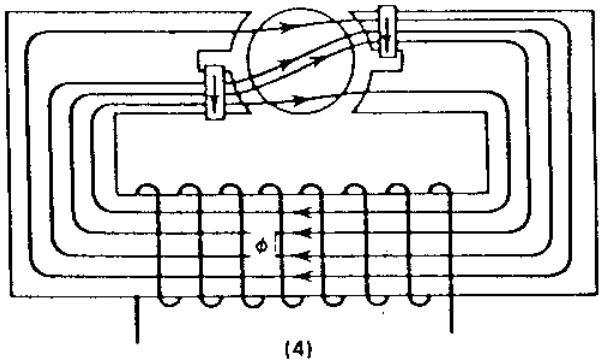
(1)



(3)



(2)

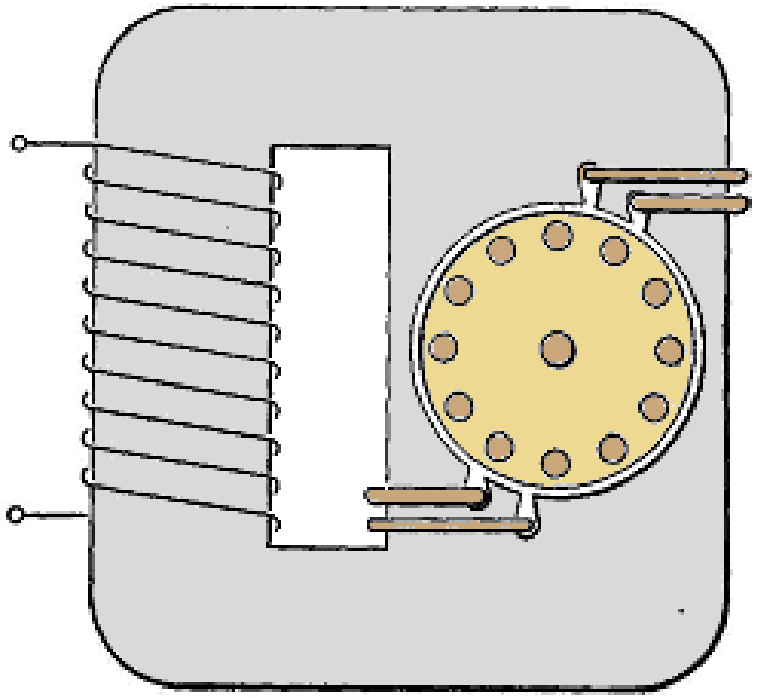


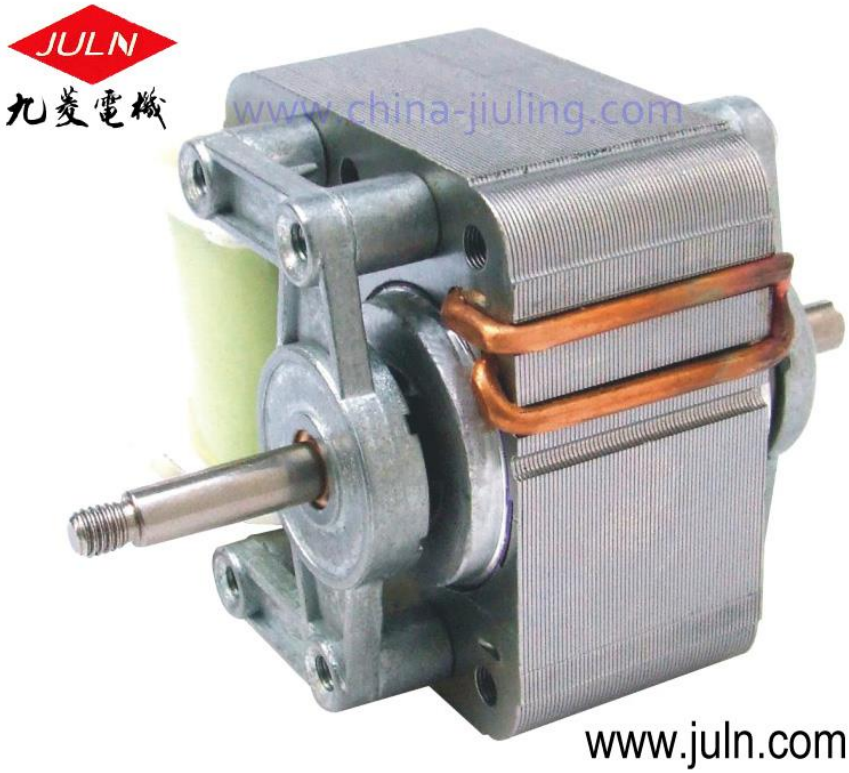
(4)

Motor de Inducción Jaula de ardilla

Métodos de partida

Motor con Espira Sombra

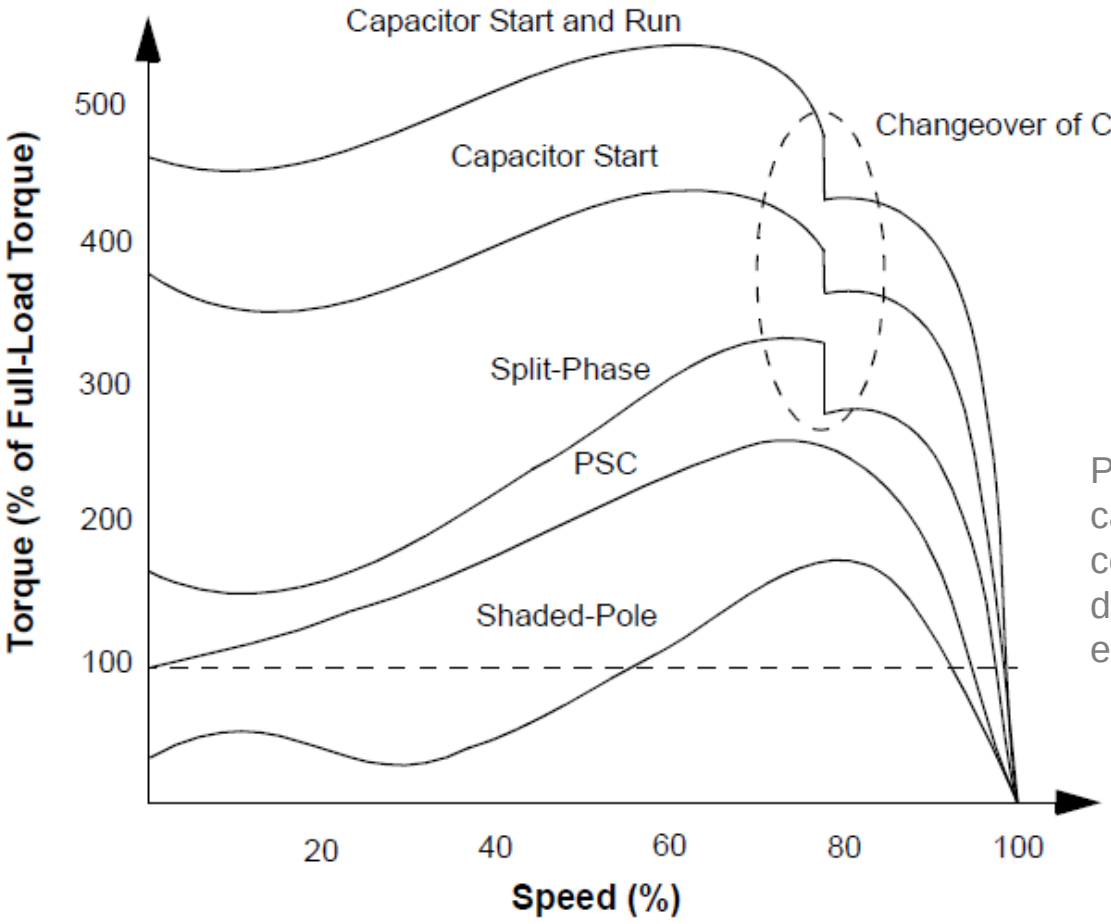




Motor de Inducción Jaula de ardilla

Métodos de partida

Resumen



PSC (permanent starting capacitor): requiere un condensador pequeño diseñado para operar todo el tiempo

Máquinas Monofásicas

Motores de Colector

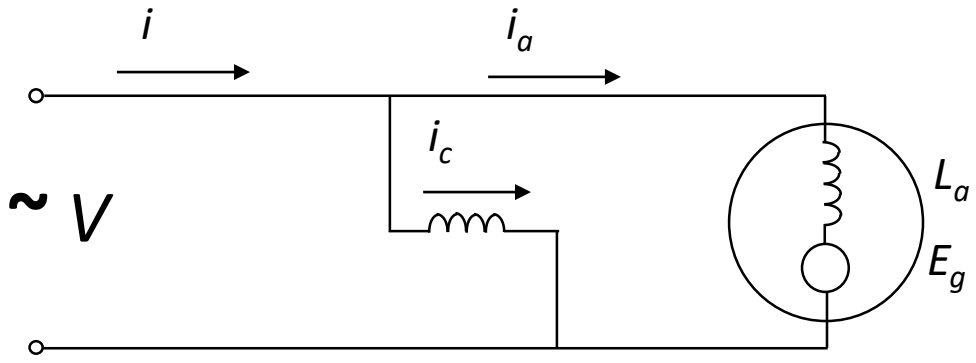
La aplicación fundamental de los motores de colector se encuentra en los aparatos que requieren altos torques de arranque. Otra característica es su alta velocidad de operación con cargas débiles.

Motores de Colector

i. derivados de las máquinas de corriente continua

i. derivados de las máquinas de inducción (estator) y dc (rotor). E.g motor de repulsión

Máquinas Monofásicas
Motor Shunt



$$T = G \cdot i_c \cdot i_a$$

$$i_a = I_{aM} \cos \omega t$$

$$i_c = I_{cM} \cos(\omega t - \theta)$$

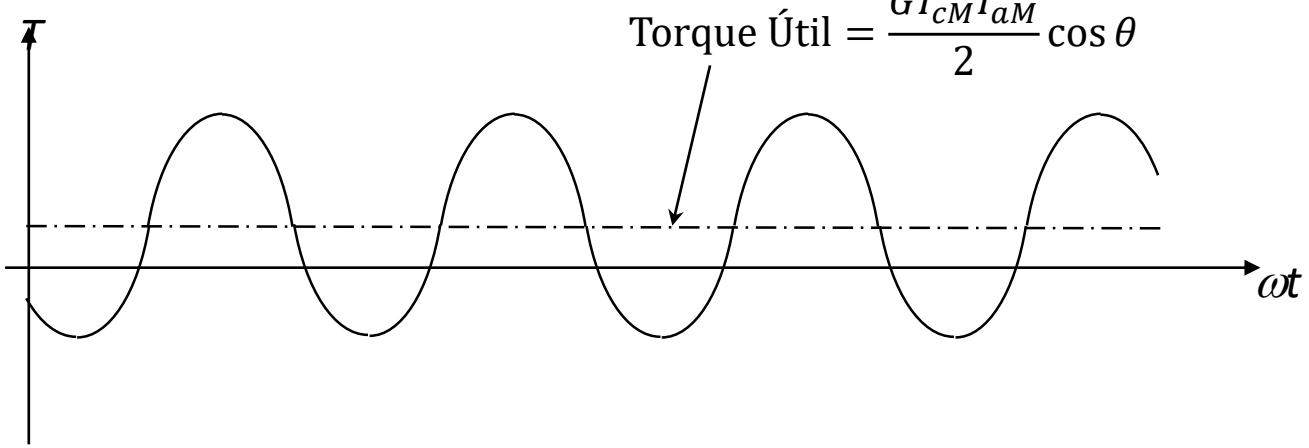
La corriente de campo i_c atrasa a la corriente i_a en un ángulo cercano a 70º, con lo cual resulta un torque medio reducido.

$$T = G \cdot i_c \cdot i_a$$

$$= G I_{cM} I_{aM} \cos \omega t \cos(\omega t - \theta)$$

$$= \frac{G I_{cM} I_{aM}}{2} [(1 + \cos 2\omega t) \cos \theta + \sin 2\omega t \sin \theta]$$

Máquinas Monofásicas
Motor Shunt



Para $\theta = 0^o$:

$$T = \underbrace{\frac{GI_{cM}I_{aM}}{2}}_{\text{componente continua}} + \underbrace{\frac{GI_{cM}I_{aM}}{2}\cos 2\omega t}_{\text{componente pulsante}}$$

Para $\theta = 90^o$:

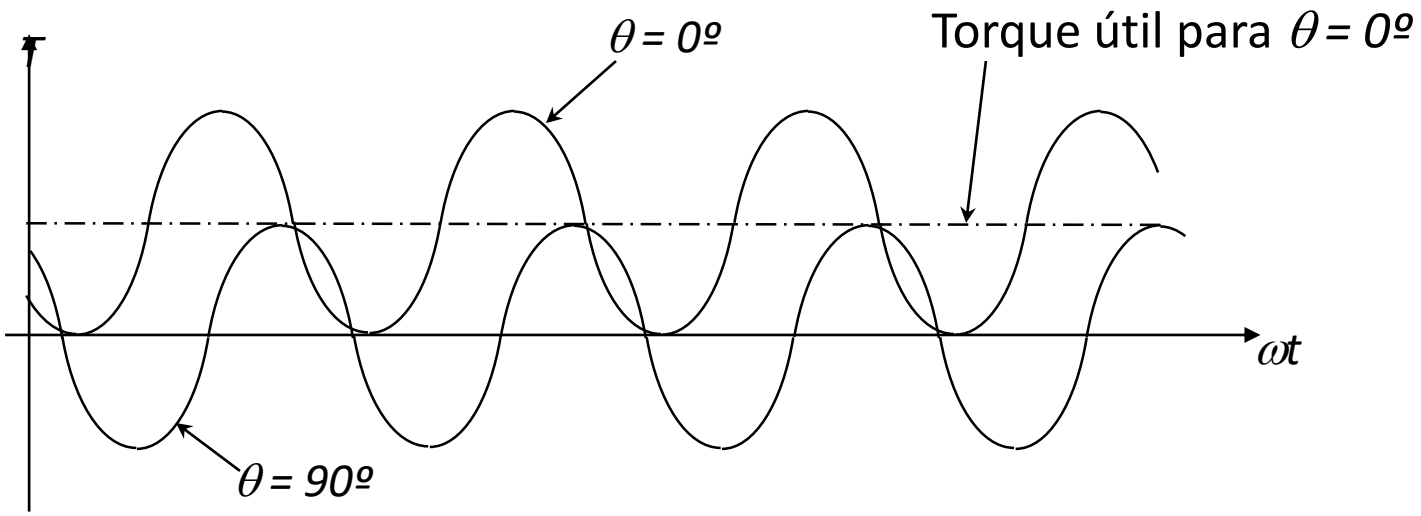
$$T = \underbrace{\frac{GI_{cM}I_{aM}}{2}\sin 2\omega t}_{\text{solo componente pulsante}}$$

Máquinas Monofásicas

Motor Shunt o Serie

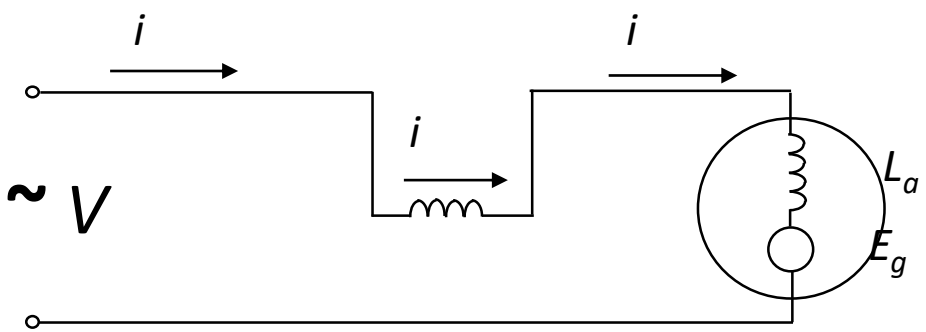
La componente continua genera el torque útil. La componente pulsante no genera torque. Por lo tanto, cuando $\theta = 90^o$, el motor no gira.

Torque óptimo cuando $\theta = 0^o$ → bobinas en serie



$\theta = 0º$ → bobinas en serie → motor serie

Máquinas Monofásicas
Motor Serie (UNIVERSAL)



Torque Electromagnético

($\theta = 0$)

$$T = G \cdot i_c \cdot i_a = G i^2$$

$$T = \underbrace{\frac{G I_M^2}{2}}_{\text{torque útil}} + \underbrace{\frac{G I_M^2}{2} \cos 2\omega t}_{\text{torque pulsante}}$$

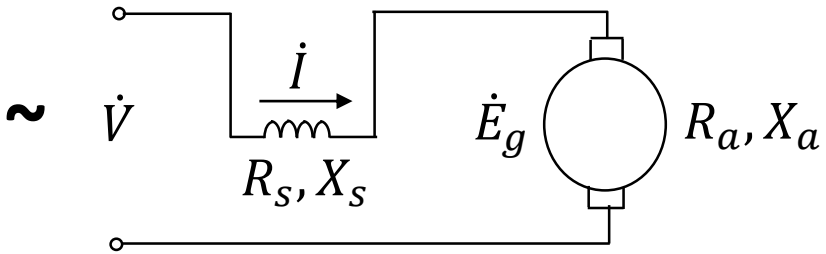
El torque útil puede expresarse en términos de la corriente efectiva I_{ef}:

$$T = \frac{G I_M^2}{2} = G \left(\frac{I_M}{\sqrt{2}}\right)\left(\frac{I_M}{\sqrt{2}}\right) = G I_{ef}^2 \longrightarrow \boxed{T = G I_{ef}^2}$$

El valor del torque útil crece cuadráticamente con la corriente: alto torque de partida.

Máquinas Monofásicas

Motor Serie (UNIVERSAL)



$$\dot{V} = R\dot{I} + jX\dot{I} + \dot{E}_g$$

$$R = R_s + R_a$$

$$X = \omega L = \omega(L_s + L_a)$$

$$\dot{E}_g = G\omega_m\dot{I} \quad \Rightarrow \quad \angle\dot{E}_g = \angle\dot{I}$$

$$\therefore \quad \dot{V} = (R + jX + G\omega_m)\dot{I}$$

$$T = GI_{ef}^2 = G\frac{V^2}{(R + G\omega_m)^2 + X^2} \longrightarrow T = \frac{GV^2}{(R + G\omega_m)^2 + (\omega L)^2}$$

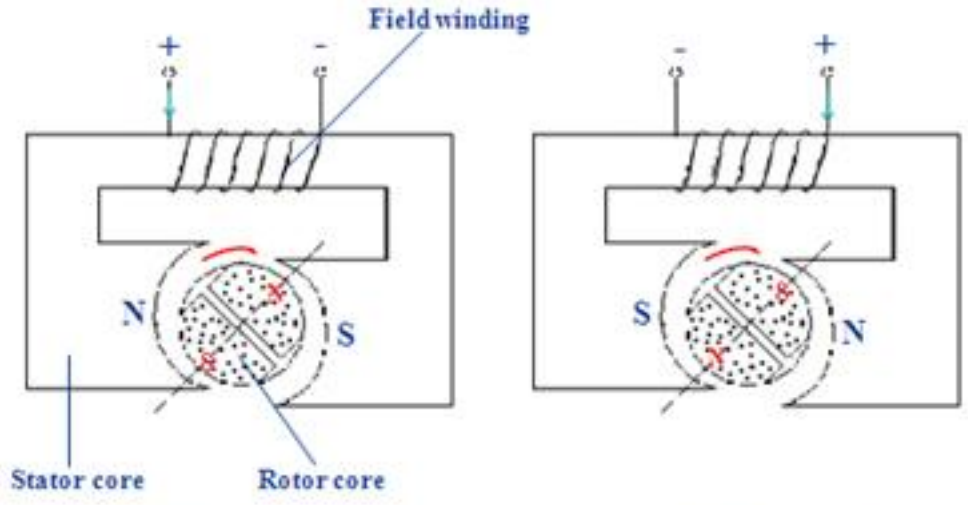
La frecuencia de operación (frecuencia de la red) afecta el torque útil a través del término $(\omega L)^2$.

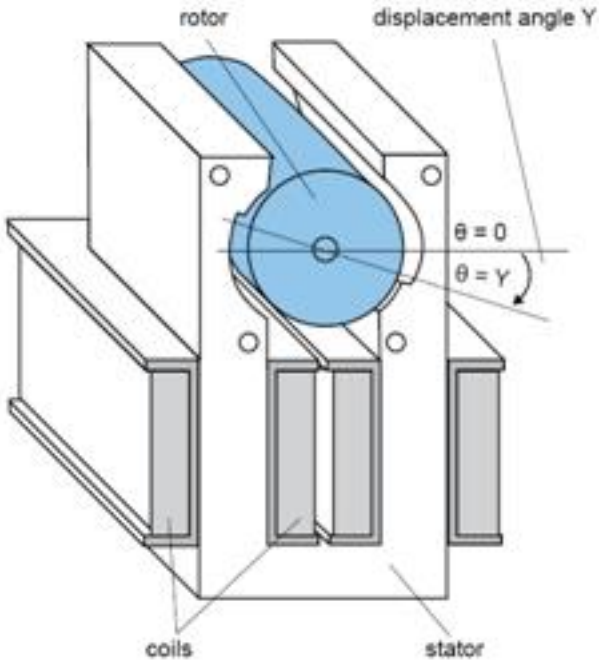
Máquinas Monofásicas

Motor Síncrono

Su velocidad es la síncrona, el sentido de giro depende de la condición inicial o de la carga durante la operación (en caso de salir de sincronismo cambia de dirección). Tiene torque de partida porque funciona a pequeñas potencias y en rotores de baja inercia (e.g. saca jugo)







Fin Lectura 9

Quedó pendiente….

- Motor de histeresis
- Motor repulsión
- Motor de inducción con partida por reluctancia
- Motor de reluctancia (ya visto en lectura 5)

Próxima Lectura

Lectura 10

Introducción a los Accionamiento y Control

