

FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

*José Francisco Gómez
González*

Benjamín González Díaz

*María de la Peña Fabiani
Bendicho*

Ernesto Pereda de Pablo



**Universidad
de La Laguna**

**Departamento de
Ingeniería Industrial**



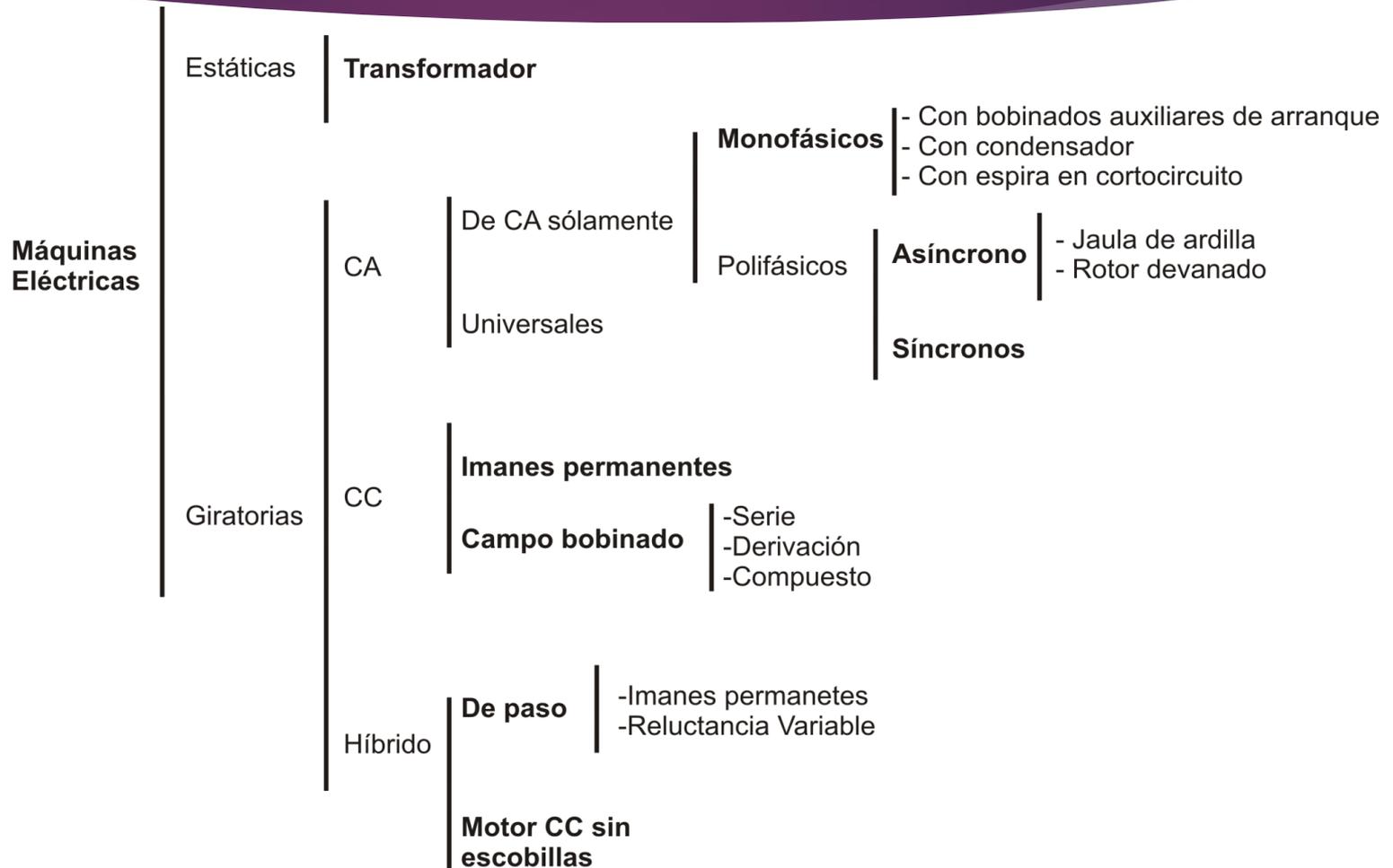
Tema 8: Máquinas asíncronas



PUNTOS OBJETO DE ESTUDIO

- ▶ Consideraciones previas de las máquinas eléctricas rotativas.
- ▶ Fundamentos de las máquinas de CA.
- ▶ Campo giratorio del estator.
- ▶ Funcionamiento como generador.
- ▶ FEM generada.
- ▶ Campo giratorio del rotor.
- ▶ Funcionamiento como motor.
- ▶ El torque inducido. La máquina de ca real.
- ▶ Rendimiento.

Consideraciones previas (I)

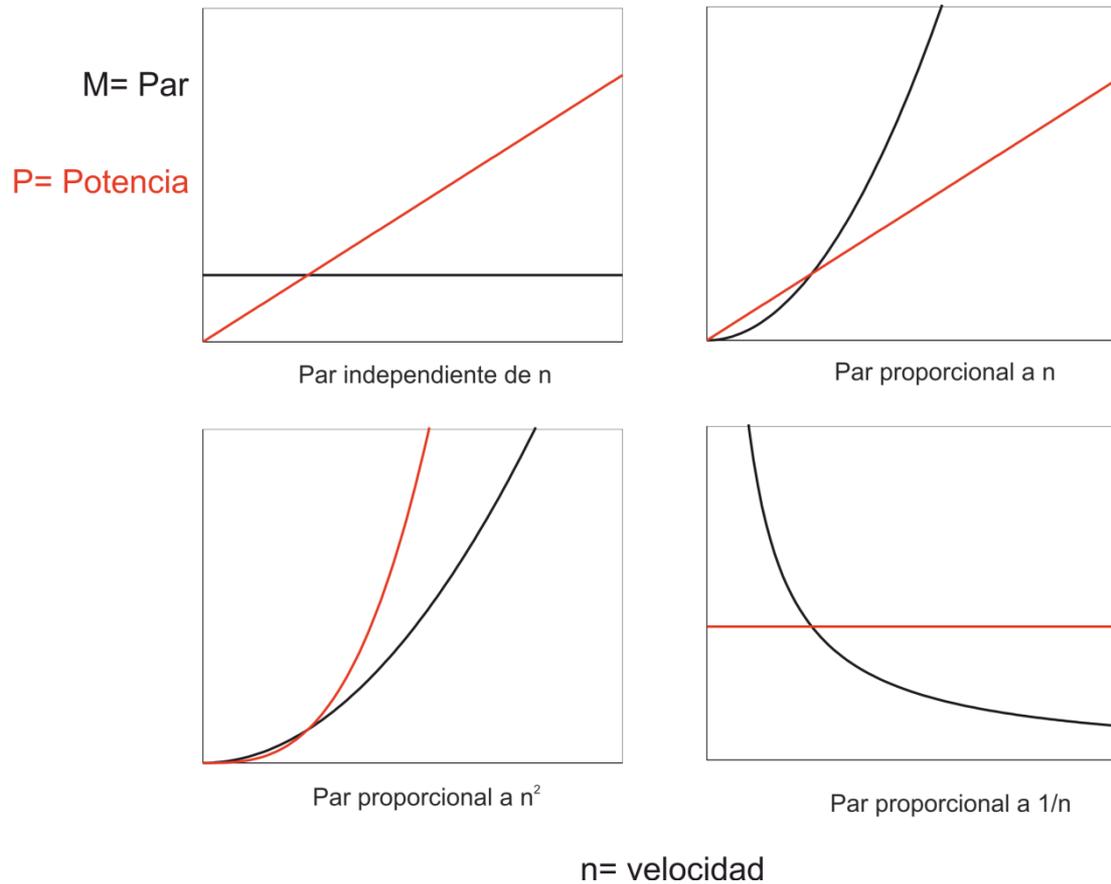


Consideraciones previas (II)

	Par	Potencia mecánica	Ejemplo
Constante	$M=K$	$P_{mec}=K*n$	Grúa
Lineal con la velocidad	$M=K*n$	$P_{mec}=K*n^2$	Vehículo de tracción
Parabólico con la velocidad	$M=K*n^2$	$P_{me}=K*n^3$	Ventiladores
Hiperbólico con la velocidad	$M=K/n$	$M=K$	Bobinadora axial

M = Par; P = Potencia; n =
velocidad

Consideraciones previas (III)



Consideraciones de servicio

- ▶ Dos motores de igual características (U, I, P, n) pero uno de los destinado a accionar un ascensor y otro un ventilador, no tienen porqué ser iguales.
 - ▶ En el primer caso el motor estará sometido frecuentemente a períodos de arranque, marcha y frenado.
 - ▶ En el segundo caso lo habitual es que puesto en funcionamiento permanezca durante largo tiempo en servicio en el mismo régimen.
- ▶ En consecuencia los calentamientos que se producen en ambos motores no son iguales y eso puede afectar a su tamaño, sistema de ventilación, tipos de materiales, etc.

Consideraciones térmicas

- ▶ El incremento de temperatura sobre la del ambiente, que experimenta una máquina en servicio está provocado por la aportación de calor producida por las pérdidas: efecto joule, pérdidas en el hierro, etc.
- ▶ La temperatura final dependerá de la capacidad de evacuar calor, tal capacidad aumenta con la superficie exterior. Se puede aumentar la evacuación forzándola por medio de refrigeración adicionales como ventiladores o mediante el bombeo de fluidos refrigerantes (agua o hidrógeno)

Pérdidas y rendimiento

- ▶ Pérdidas en los conductores por efecto Joule, pérdidas en el hierro, pérdidas mecánicas por rozamiento, calentamientos locales por pulsaciones de flujo, etc.

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} = \frac{P_{entrada} - P_{pérdidas}}{P_{entrada}}$$

Descripción de una máquina eléctrica rotativa (I)

- ▶ El espacio de aire que separa el estator y el rotor, necesario para que pueda girar la máquina es el entrehierro, siendo el campo magnético existente en el mismo el que constituye el medio de acoplamiento entre los sistemas eléctrico y mecánico
- ▶ El estator y el rotor se construyen con material ferromagnético, para evitar pérdidas en el Fe suelen realizarse con chapas magnéticas de acero al silicio, ranuradas para alojar en su interior los devanados.

Descripción de una máquina eléctrica rotativa (II)

- ▶ Uno de los devanados tiene por misión crear un flujo en el entrehierro y por ello se denomina inductor (excitación o campo). El otro devanado recibe el flujo del primero y se inducen en él corrientes y se denomina inducido.
- ▶ El material para la realización de las bobinas suele ser Cu cubierto de aislante en máquinas de gran potencia cuyo aislamiento en con cinta de algodón.

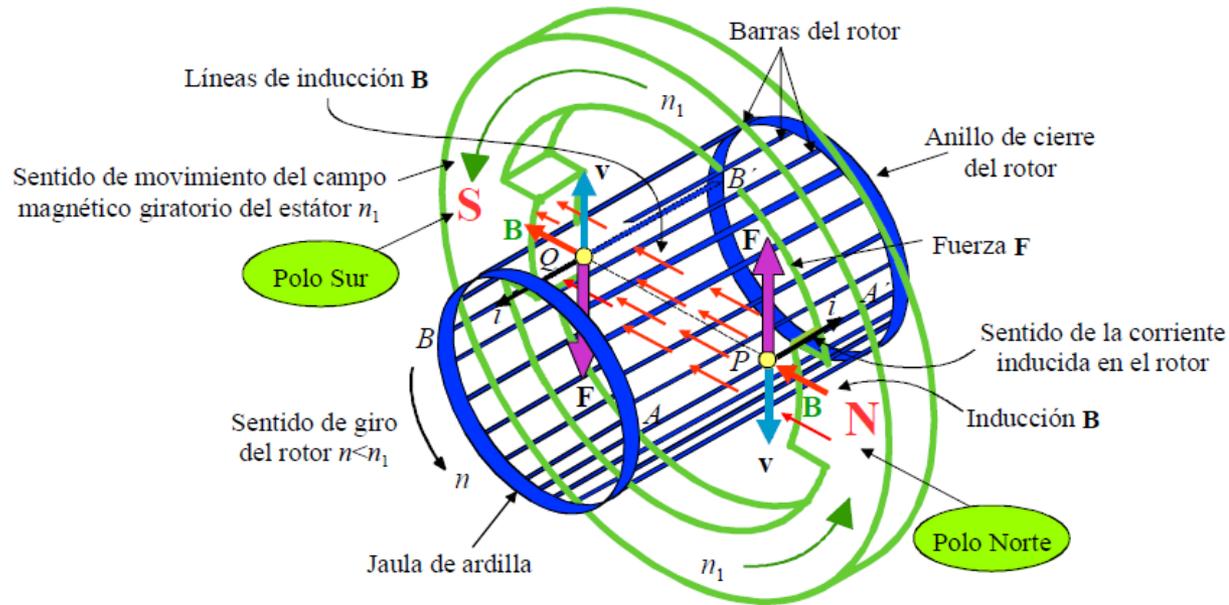
F.m.m. y B en el entrehierro de una máquina eléctrica (I)

- ▶ El campo magnético en el entrehierro de una máquina eléctrica es el resultado de las f.m.m.s. combinadas de los devanados inductor e inducido que actúan en esa región.
- ▶ En principio, es el devanado inductor el que produce el campo en el entrehierro, creando f.e.m.s. en el devanado del inducido, que dan lugar a corrientes cuando se cierra el circuito por un sistema exterior.
- ▶ Al circular una intensidad por el devanado del inducido, se crea una f.m.m. de reacción de inducido, que al combinarse con la f.m.m. del inductor origina el campo magnético resultante en el entrehierro de la máquina.

F.m.m. y B en el entrehierro de una máquina eléctrica (II)

- ▶ En la práctica constructiva habitual de las máquinas eléctricas, con objeto de aprovechar toda la periferia tanto del estator como del rotor, las bobinas se distribuyen en ranuras.
- ▶ Esto permite no solamente una utilización más óptima de la máquina sino también una mejora en la calidad de la onda de f.m.m. e inducción, que se traducirá una f.e.m. inducida en las bobinas de carácter más sinusoidal.

F.m.m. producida por un devanado trifásico. Campo giratorio (I)



F.m.m. producida por un devanado trifásico. Campo giratorio (II)

- ▶ Consideramos un sistema formado por tres devanados (en estator o rotor) que estén desfasados entre sí 120° eléctricos en el espacio.
- ▶ Calculamos la f.m.m. que existe en un punto del entrehierro, determinado por θ , respecto al eje del devanado AA', debido a la contribución de los tres arrollamientos, al circular por ellos un sistema de corrientes trifásicas equilibradas

Teorema de Ferraris

- ▶ Teorema de Ferraris: es posible producir un campo magnético giratorio, a partir de tres devanados desfasados 120° eléctricos en el espacio, por los que se introducen corrientes desfasadas 120° en el tiempo.
- ▶ Nota: si se realiza el devanado para 4 polos, serán necesarios 2 ciclos de variación de la corriente para obtener una revolución en la f.m.m.

Aspectos constructivos de las máquinas asíncronas

- ▶ Los motores asíncronos o de inducción son un tipo de motores eléctricos de corriente alterna.
- ▶ El motor asíncrono trifásico está formado por un rotor, que puede ser de dos tipos: de jaula de ardilla o de bobinado; y un estator, en el que se encuentran las bobinas inductoras.

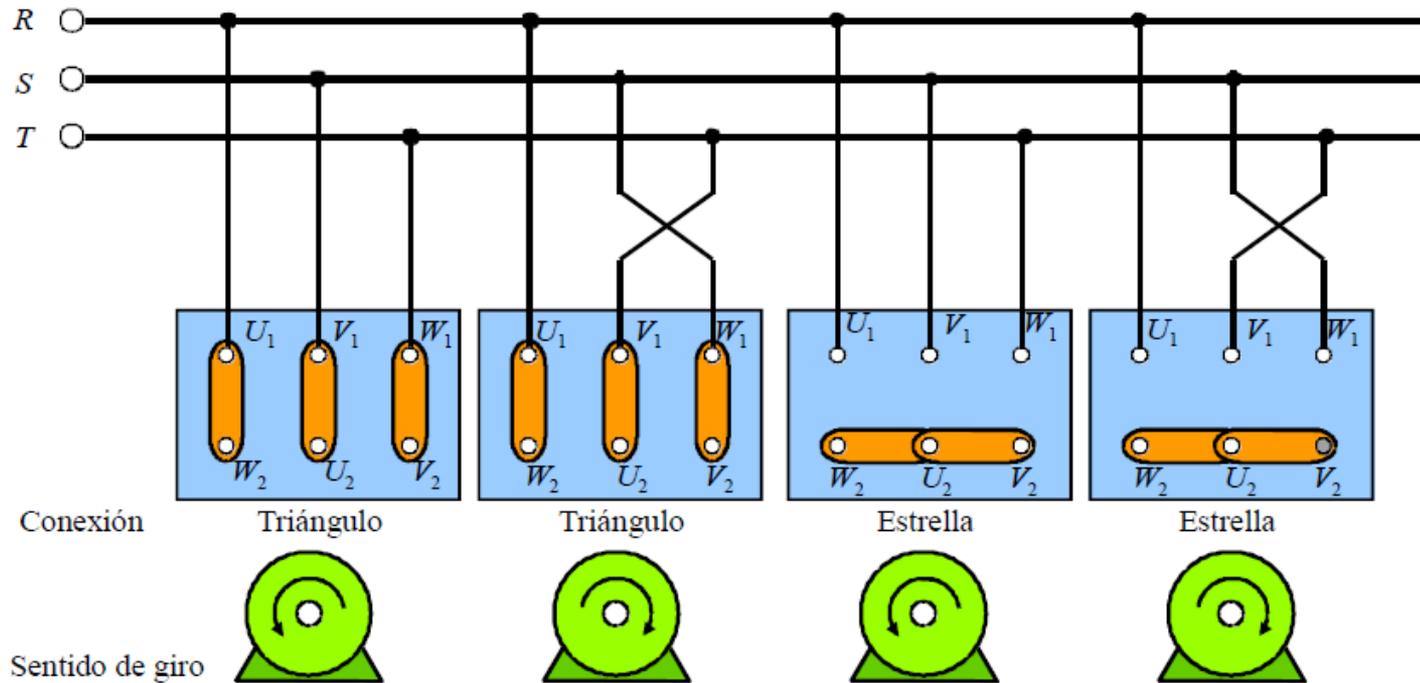
Rotor de jaula de ardilla (I)

- ▶ Consta de un rotor constituido por una serie de conductores metálicos (normalmente de aluminio) dispuestos paralelamente unos a otros, y cortocircuitados en sus extremos por unos anillos metálicos, esto es lo que forma la llamada jaula de ardilla.
- ▶ Esta 'jaula' se rellena de material, normalmente chapa apilada, teniéndose un sistema muy eficaz, simple, y muy robusto.

Rotor de bobinado

- ▶ Está constituido por una serie de conductores bobinados sobre él en unas ranuras situadas sobre su superficie.
- ▶ Este rotor es mucho más complicado de fabricar y mantener que el de jaula de ardilla, pero permite el acceso al mismo desde el exterior a través de unos anillos que son los que cortocircuitan los bobinados.
- ▶ Esto tiene ventajas, como la posibilidad de utilizar un reostato de arranque que permite modificar la velocidad y el par de arranque, así como el reducir la corriente de arranque.

Conexiones



Principio de funcionamiento (I)

- ▶ Las bobinas están desfasadas entre sí 120° . Según el Teorema de Ferraris, cuando circula un sistema de corrientes se induce un campo magnético giratorio que envuelve al rotor. Este campo magnético variable va a inducir una tensión en el rotor según la Ley de inducción de Faraday.
- ▶ Con estas condiciones se produce el efecto Laplace que dice: “todo conductor por el que circula una corriente eléctrica, inmerso en un campo magnético experimenta una fuerza que lo tiende a poner en movimiento”.

Principio de funcionamiento (II)

- ▶ El campo magnético gira a una velocidad denominada de sincronismo. Sin embargo el rotor gira algo más despacio, para que el campo magnético deje de ser variable con respecto al rotor, con lo que no aparece ninguna corriente inducida en el rotor, y por tanto no aparecen un par de fuerzas que lo impulsan a moverse.

Principio de funcionamiento (III)

- ▶ El devanado del estator está formado por 3 arrollamientos desfasados 120° en el espacio y de $2p$ polos, al introducir corriente trifásica a f_1 se produce un flujo giratorio cuya velocidad de sincronismo es

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$$

- ▶ donde f_1 es la frecuencia del sistema, en Hz, p es el número de pares de polos en la máquina y n viene dada en revoluciones por minuto (rpm).

Principio de funcionamiento (IV)

- ▶ También existen motores asíncronos monofásicos, en los cuales el estator tiene un bobinado monofásico y el rotor es de jaula de ardilla. Son motores de pequeña potencia y en ellos, en virtud del Teorema de Leblanc, el campo magnético es igual a la suma de dos campos giratorios iguales que rotan en sentidos opuestos.

Concepto de deslizamiento (I)

- ▶ La velocidad del deslizamiento, s , se define como la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor:

$$n_{des} = n_{\text{sinc}} - n_m \qquad s = \frac{n_{\text{sinc}} - n_m}{n_{\text{sinc}}}$$

- ▶ El otro término utilizado para describir el movimiento relativo es el deslizamiento, que es igual a la velocidad relativa expresada como una fracción de la unidad o un porcentaje:

$$n = \frac{n_{\text{sinc}} - n_m}{n_{\text{sinc}}} (x100\%)$$

Concepto de deslizamiento (II)

- ▶ Se puede comprobar que si el rotor gira a velocidad síncrona, entonces $s=0$, mientras que si el rotor está estacionario, $s=1$.
- ▶ La E_{2s} produce corrientes en el rotor de frecuencia f_2 , por lo que creará un campo giratorio, cuya velocidad respecto a su propio movimiento será

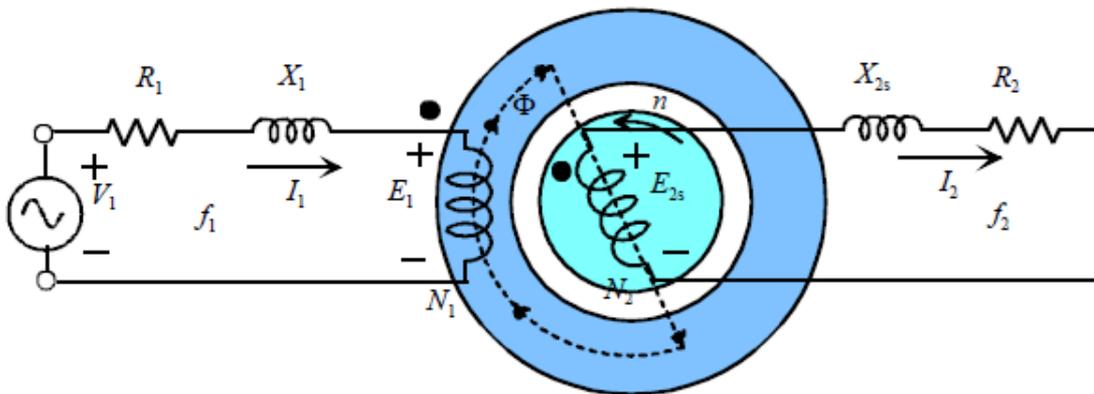
$$n_2 = \frac{60f_2}{p}$$

- ▶ El campo del rotor gira en sincronismo con el campo del estator

$$n_2 + n \Rightarrow n_2 + n = (n_1 - n) + n = n_1$$

Circuito equivalente por fase

- ▶ Es similar a un transformador con un secundario en cortocircuito



donde R_1 y R_2 ohmios/fase son las resistencias de los arrollamientos. Los flujos de dispersión en los devanados del rotor y estator dan lugar a las autoinductancias: L_{d1} y L_{d2}

$$\underline{V}_1 = \underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1$$

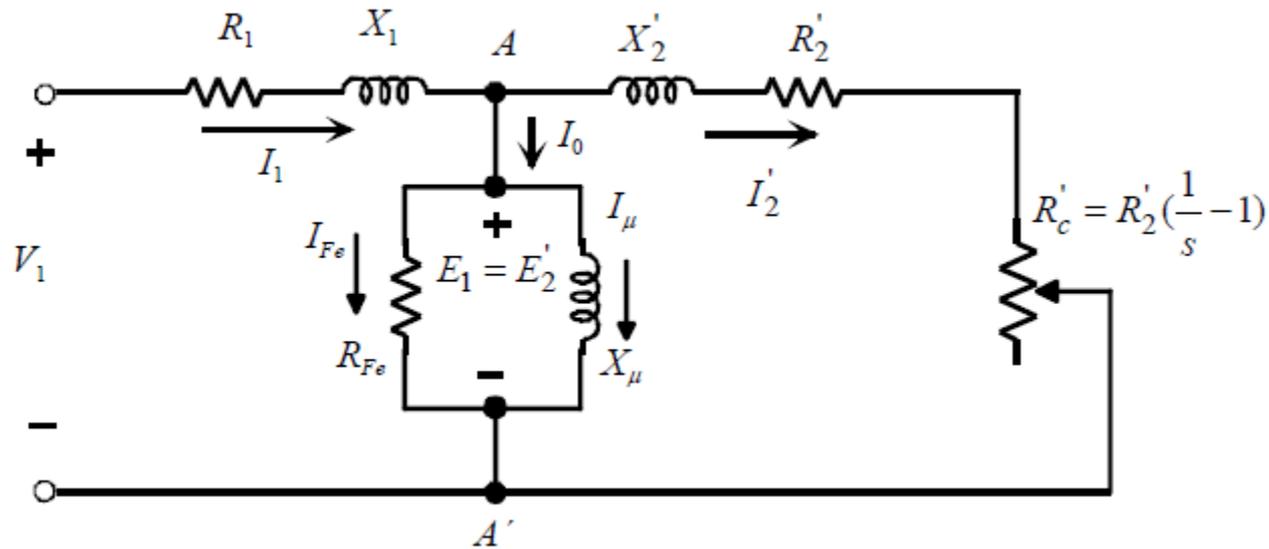
$$\underline{E}_{2s} = R_2 \underline{I}_2 + jX_{2s} \underline{I}_2$$

$$X_1 = L_{d1} \omega_1 = L_{d1} 2\pi f_1$$

$$\text{Para rotor parado } X_2 = L_{d2} \omega_1 = L_{d2} 2\pi f_1$$

$$\text{Para rotor girando } X_{2s} = L_{d2} \omega_2 = L_{d2} 2\pi f_2 = sX_2$$

Circuito equivalente exacto del motor asíncrono



$$R'_2 = m^2 R_2$$

$$X'_2 = m^2 X_2$$

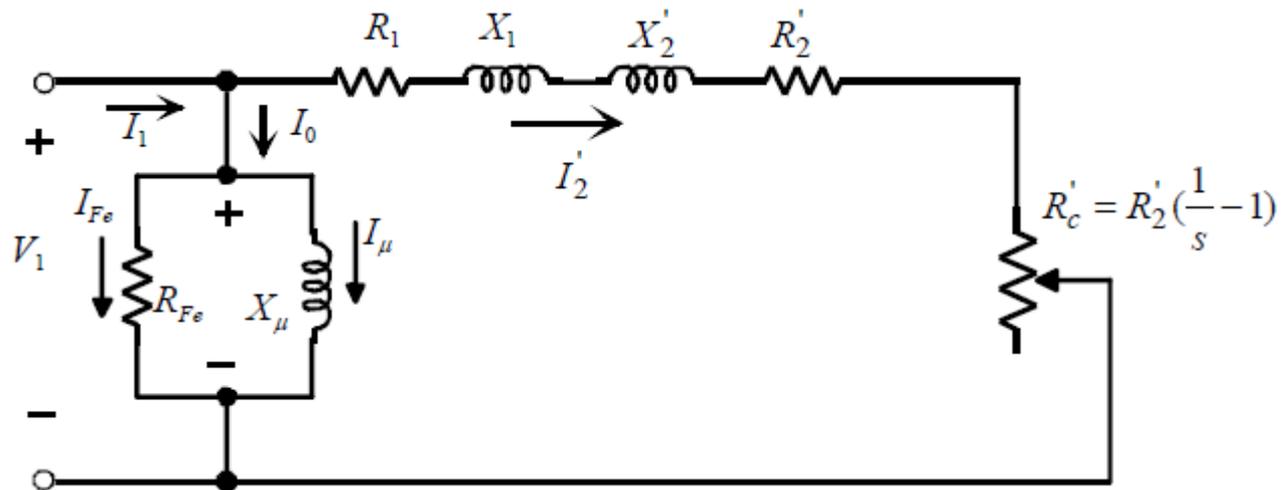
$$R'_c = m^2 R_c$$

$$I_1 = I_0 + I'_2 = I_0 + \frac{I_2}{m_i}$$

$$\underline{V}_1 = \underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1$$

$$\underline{E}'_2 = R'_2 \underline{I}'_2 + R'_c \underline{I}'_2 + jX'_2 \underline{I}'_2$$

Circuito equivalente aproximado del motor asíncrono ($P > 10\text{kW}$)



Ensayo de vacío o de rotor libre

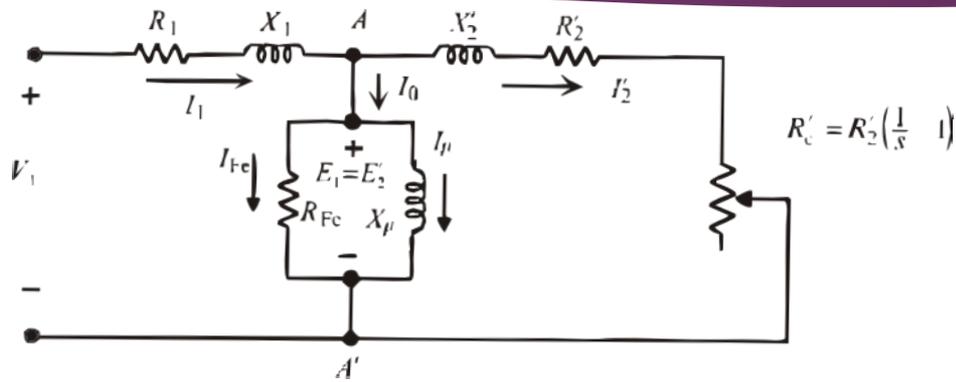
- ▶ El motor funciona sin ninguna carga mecánica en el eje.
- ▶ Se debe aplicar la tensión asignada al primario V_{1n} , midiendo la potencia absorbida P_o y la corriente de vacío I_o .
- ▶ En estas circunstancias el motor en vacío gira a una velocidad muy cercana a la del campo giratorio ($s \rightarrow 0$) por lo que la resistencia de carga $R'c \rightarrow \infty$. Como no se ejerce ningún par de carga en el eje, la potencia disipada en esta resistencia es la pérdida mecánica en rozamiento y ventilación del motor.
- ▶ Como I'^2 es pequeño porque $R'c$ es grande se pondrán despreciar las pérdidas en el Cu del devanado del rotor.

$$P_o = P_{Fe} + P_m + P_{Cu-rotor}$$

Ensayo de cortocircuito o de rotor bloqueado (I)

- ▶ Este ensaño se realiza bloqueando el rotor, $n=0 \rightarrow s=1 \rightarrow R'_c=0$
- ▶ Por tanto el Motor es equivalente a un Trafo con secundario en cortocircuito.
- ▶ Al estátor se le aplica una tensión creciente desde cero hasta que la corriente absorbida sea $I_{1cc}=I_{1n}$ (por fase)
- ▶ Se mide V_{1cc} , I_{1cc} y P_{cc} (total)
- ▶ I_o es despreciable frente a I_{1n}

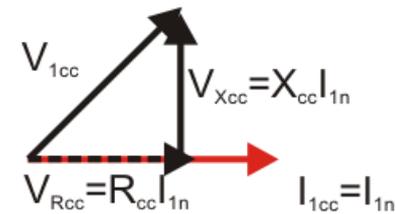
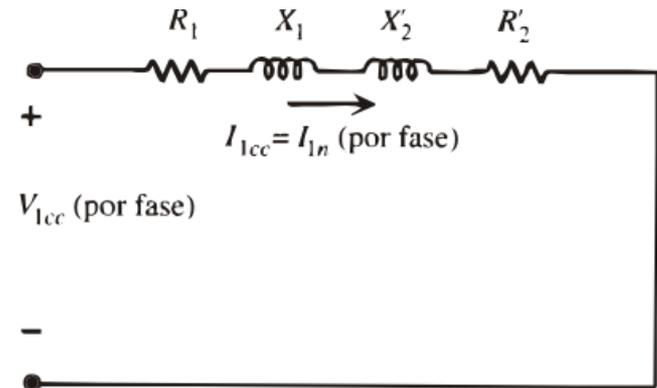
Ensayo de cortocircuito o de rotor bloqueado (II)



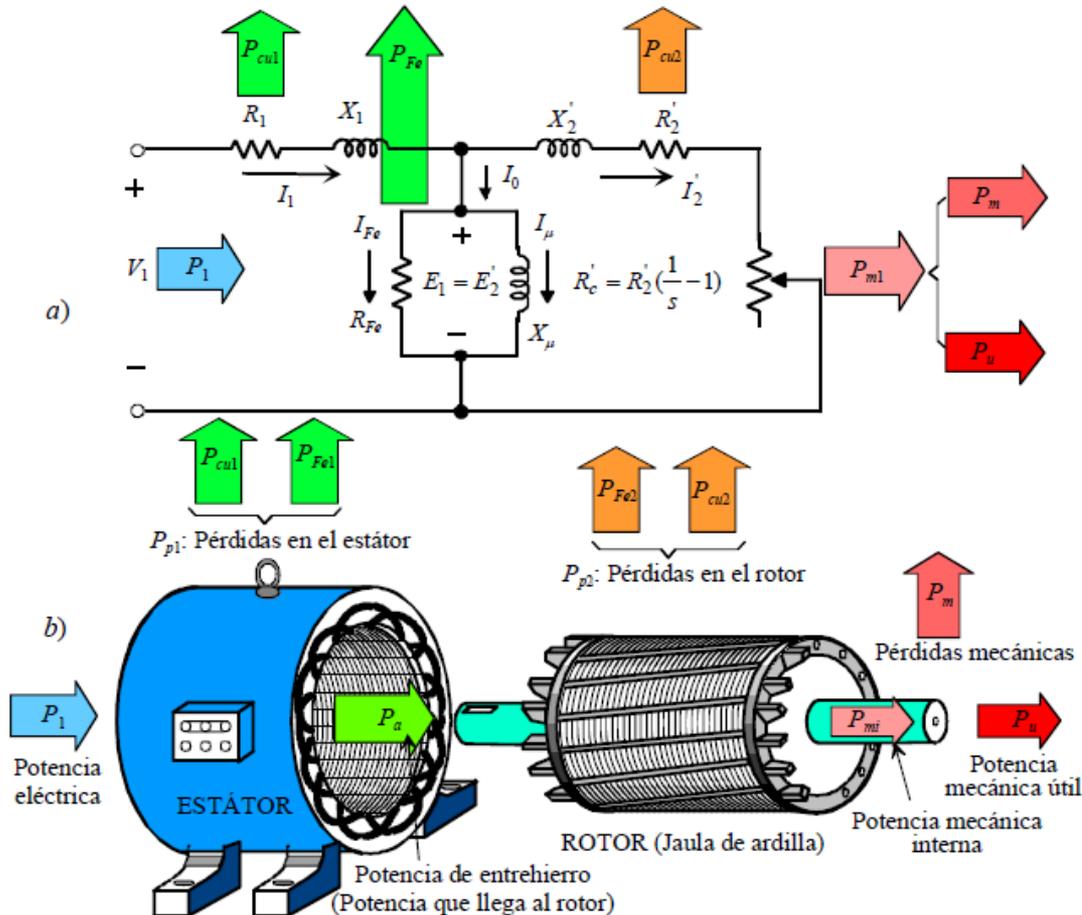
$$\cos \phi_{cc} = \frac{P_{cc}}{m_1 V_{1cc} I_{1n}}$$

$$R_{cc} = R_1 + R'_2 = \frac{V_{Rcc}}{I_{1n}} = \frac{V_{1cc} \cos \phi_{cc}}{I_{1n}}$$

$$X_{cc} = X_1 + X'_2 = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \sin \phi_{cc}$$



Balance de potencias



$$P_{mi} = P_a - P_{Cu2}$$

$$P_{mi} = m_1 R'_c I_2'^2 = m_1 R'_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) I_2'^2$$

$$\Rightarrow \frac{P_{Cu2}}{P_{mi}} = \frac{s}{1-s} \Rightarrow P_{Cu2} = s P_a$$

$$P_a = P_{mi} + P_{Cu2} = m_1 \frac{R'_2}{s} I_2'^2 = \frac{P_{Cu2}}{s} = \frac{P_{mi}}{1-s}$$

- La potencia útil en el eje será

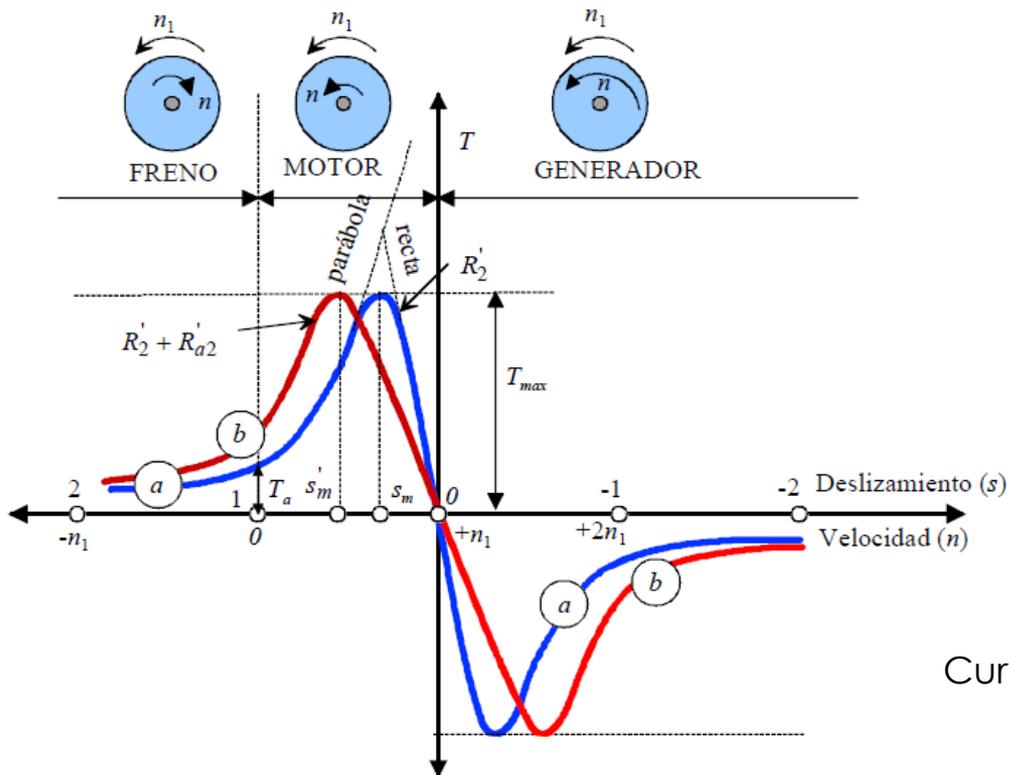
$$P_u = P_{mi} - P_m$$

- Siendo P_m las pérdidas mecánicas por rozamiento y ventilación

- El rendimiento del motor

$$\eta = \frac{P_u}{P_1} = \frac{P_u}{P_u + P_m + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_{cu1}}$$

Par de rotación



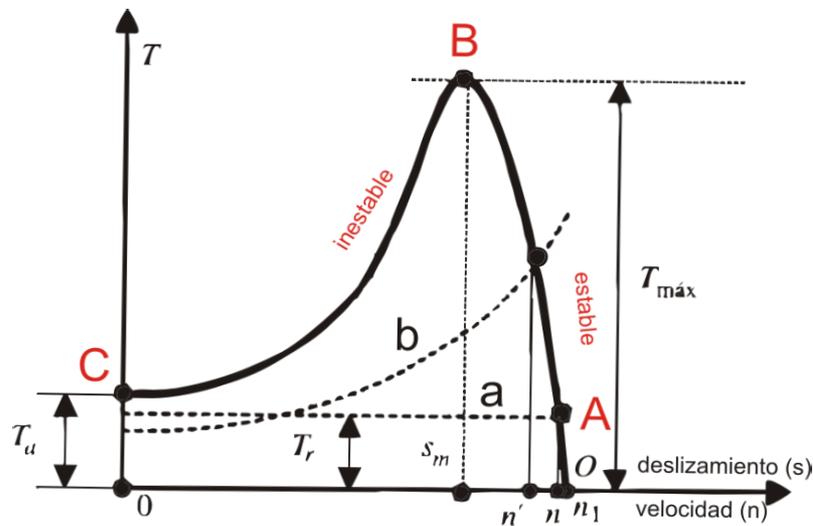
$$T = \frac{P_u}{\omega} = \frac{P_u}{\frac{2\pi n}{60}}$$

ω velocidad angular de giro, n en r.p.m.

$$T = \frac{m_1 \frac{R'_2}{s} V_1^2}{2\pi \frac{n_1}{60} \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{cc}^2 \right]}$$

Curva Par-Velocidad de una máquina asíncrona

Curva Par-Velocidad de un motor asíncrono



- ▶ **Punto O.** Funcionamiento en sincronismo: $s=0 \rightarrow T=0$ (imposible físicamente). La máquina a esta velocidad no podría ni tan siquiera vencer los pares resistentes de rozamiento.
- ▶ **Punto A.** Régimen asignado o nominal: $s=s_n \rightarrow T=T_n$ se produce para s entre 3% y 8%
- ▶ **Punto B.** Funcionamiento con par máximo: $s=s_m \rightarrow T=T_m$ se produce para s entre 15% y 30%
- ▶ **Punto C.** Régimen de arranque: $s=1 \rightarrow T=T_a$ la velocidad es cero, y par es de arranque.

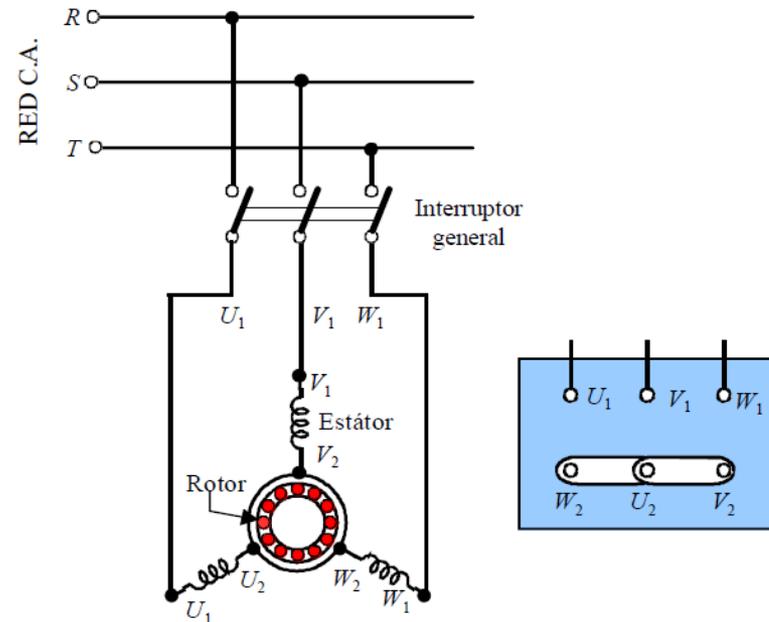
Arranque

- ▶ Se denomina arranque al proceso de puesta en marcha de una máquina eléctrica.
- ▶ El proceso de arranque va acompañado de un consumo elevado de corriente, la $R'_c=0$ en $t=0$ pues $s=1$, y el motor ofrece una baja impedancia.
- ▶ En España el RBT (Real Decreto 842/2002, 2 de agosto) en su instrucción ITC-BT-47 fija los límites de la relación corriente de arranque/corriente de plena carga para motores de c.a.
- ▶

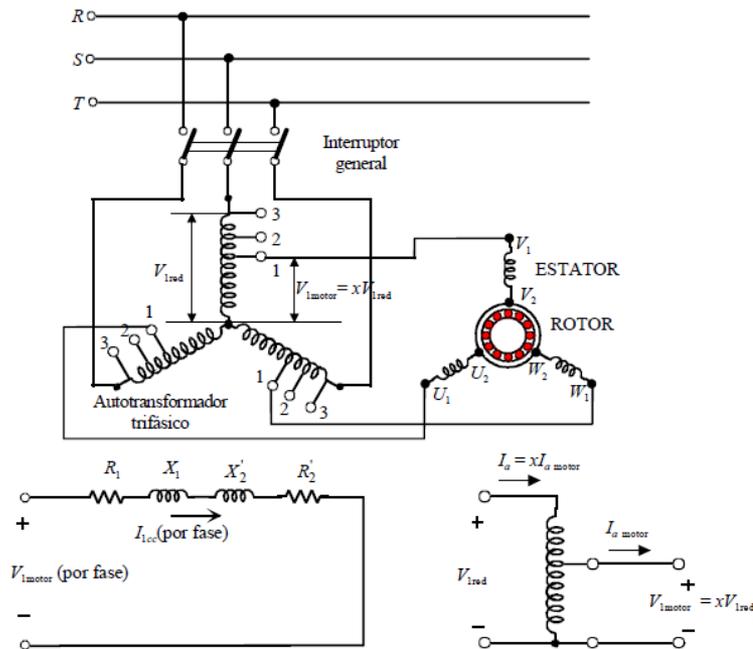
Potencia asignada del motor	$I_{\text{arranque}}/I_{\text{plena carga}}$
0.75 – 1.5 Kw	4.5
1.5 – 5.0 Kw	3.0
5.0 – 15.0 Kw	2.0
> 15.0 Kw	1.5
- ▶ Para reducir las corrientes de arranque se emplean métodos especiales de arranque

Arranque de los motores en jaula de ardilla: arranque directo

- ▶ Se emplea en los motores de pequeña potencia (<5 Kw)
- ▶ Esquema eléctrico del arranque directo en configuración estrella



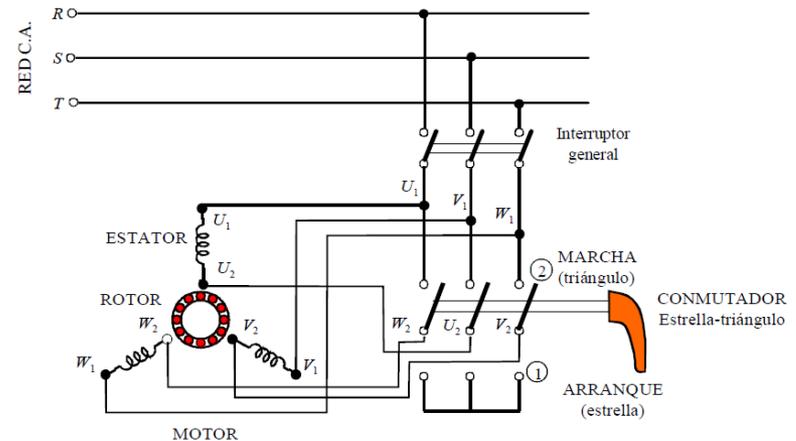
Arranque de los motores en jaula de ardilla: arranque por autotransformador



- Consiste en intercalar un autotransformador entre la red y el motor, de tal forma que la tensión aplicada en el arranque sea sólo una fracción de la asignada.

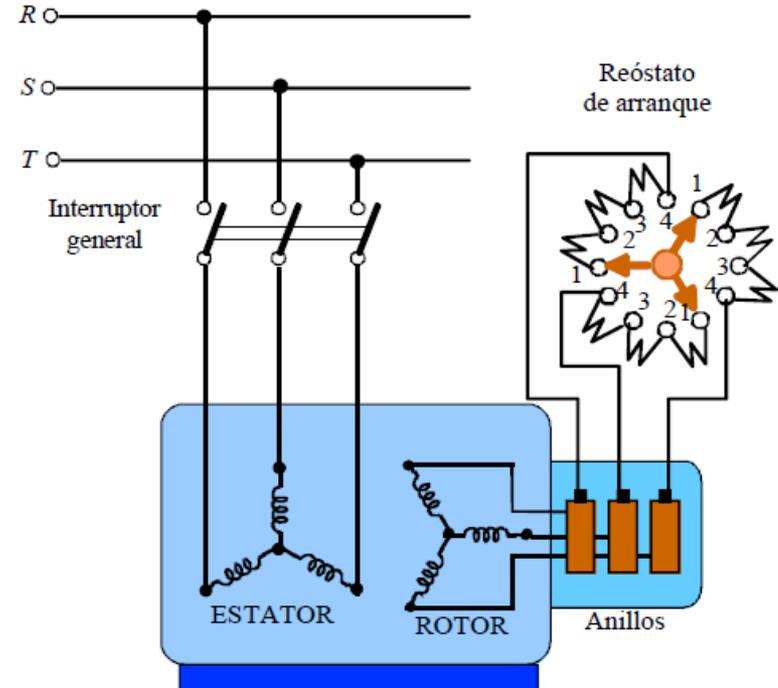
Arranque de los motores en jaula de ardilla: Conmutación estrella-triángulo

- ▶ Es sólo aplicable en aquellos motores que están preparados para funcionar en triángulo con la tensión de la red.
- ▶ La máquina se conecta en Y en el arranque y se pone después en Δ



Arranque de los motores de rotor bobinado

Se puede reducir la corriente de arranque introduciendo una resistencia adicional a cada una de las fases del rotor, esto se hace con un reóstato trifásico.



Regulación de velocidad

- ▶ Los principios generales que pueden aplicarse para controlar la velocidad de los motores asíncronos:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \Rightarrow n = n_1(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s)$$

- ▶ Por tanto la velocidad del rotor, n , depende del deslizamiento, la frecuencia y del número de pares de polos.
 - ▶ Regulación por variación del número de polos
 - ▶ Regulación por variación del deslizamiento
 - ▶ Regulación por variación en la frecuencia

Regulación por variación del número de polos

- ▶ Variando el número de polos del estator, cambia la velocidad del campo giratorio y por tanto la velocidad de rotación del motor.
- ▶ Se utiliza en general dos combinaciones diferentes, dando dos escalones de velocidad en relación 2:1
- ▶ Para que el funcionamiento sea posible es preciso que el rotor sea de jaula de ardilla, ya que se adapta automáticamente por inducción su número de polos al del estator.
- ▶ Estos motores son motores de conexión Dahlander.

Regulación por variación del deslizamiento

- ▶ La variación del deslizamiento se puede realizar controlando la tensión aplicada al rotor (pero afecta al par) o variando la resistencia del motor (pero produce grandes pérdidas por efecto Joule).
- ▶ Existen otros sistemas basados en la regulación de la potencia de deslizamiento sPa de la máquina (se devuelve la potencia sPa a la red, ejemplos sistema Kramer, Scherbius, Scharage).

Regulación por variación en la frecuencia

- ▶ La frecuencia se puede variar usando dispositivos como el SRC (rectificadores controlados de silicio o tiristores)
- ▶ Mediante esta regulación se debe mantener el flujo constante para que el par se conserve por lo que debe variar V_1 con la frecuencia f_1 para mantener el flujo constante

$$\text{si } V_1 \approx E_1 \Rightarrow V_1 = 4.44K_1 f_1 N_1 \phi_m$$

$$\Rightarrow \phi_m = \text{cte si } \frac{V_1}{f_1} = \text{cte}$$

Frenado

- ▶ Frenado por inversión del sentido de giro del campo del estator
 - ▶ La inversión de la secuencia de las fases puede utilizarse para la parada rápida del motor pero, en este caso se debe cortar la alimentación del motor cuando se llega a la velocidad nula del motor
- ▶ Frenado por inyección de corriente continua

$$n = \frac{60f}{p}$$

Generador asíncrono (I)

- ▶ Este tipo de generadores no está muy extendido; aunque de todas formas, se tiene una gran experiencia en tratar con máquinas asíncronas. La máquina asíncrona fue inicialmente diseñada como motor eléctrico.
- ▶ De hecho, una tercera parte del consumo mundial de electricidad es utilizado para hacer funcionar motores de inducción que muevan maquinaria en fábricas, bombas, ventiladores, compresores, elevadores, y otras aplicaciones donde se necesita convertir energía eléctrica en energía mecánica.

Generador asíncrono (II)

- ▶ En una máquina asíncrona, para deslizamientos negativos, o sea, cuando el rotor gira en el mismo sentido, pero a más velocidad que lo hace el campo estático, el par motor, al ser negativo, se opone al giro y se mantendrá solamente si se aplica al eje un par que venza la acción resistente de aquel.
- ▶ En esta zona de trabajo la máquina se comporta como un generador de inducción que transforma la energía mecánica que procede del eje del motor, en energía eléctrica que se inyecta en la red.

Generador asíncrono (III)

- ▶ La primera consideración que debe destacarse de esta forma de trabajo es que debe quedarnos claro es que la máquina sólo genera energía eléctrica si está conectada a una red de alterna.
- ▶ Si desconectamos un motor de inducción y tratamos de que genere simplemente haciendo girar su rotor, no obtendremos ninguna salida porque no se dispone del campo giratorio del estator ni del flujo correspondiente a este campo que sólo aparece cuando el motor toma la corriente magnetizante que precisa de la red de alterna.

Generador asíncrono (IV)

- ▶ Desde hace unos años se han puesto a punto generadores de inducción auto-excitados, en los cuales esta corriente magnetizante se obtiene a partir de una batería de condensadores puesta en paralelo con la salida del estator que ahora no está conectada a red alguna sino a la carga que atiende.
- ▶ Los generadores de inducción pueden tener interés cuando se quiere tener una cierta flexibilidad en la velocidad de giro a la que generamos la energía eléctrica ya que la frecuencia de las tensiones generadas viene fijada por la frecuencia de la red y no por la velocidad a la que gira el eje del generador. Se ha utilizado con éxito en GENERADORES EÓLICOS.

Motor de inducción monofásico (I)

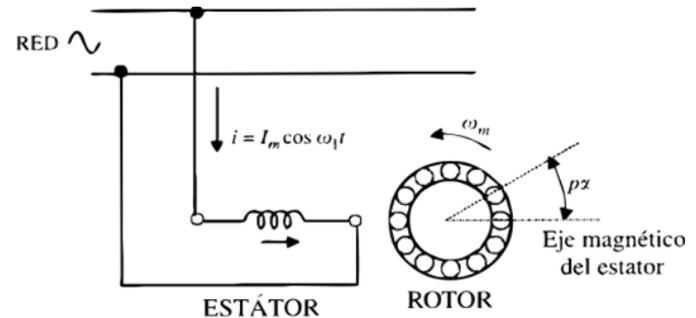
- ▶ Formado por:
 - ▶ rotor en jaula de ardilla
 - ▶ un estator con un devanado alimentado con corriente alterna monofásica.
- ▶ Al introducir una corriente interna en el devanado del estator se produce una f.m.m. en el entrehierro, distribuida senoidalmente en el espacio y de carácter pulsatorio

Motor de inducción monofásico (II)

- ▶ La f.m.m. produce un campo magnético, el cual induce corrientes en el rotor.
- ▶ Según el teorema de Leblanc

$$F(\alpha, t) = \frac{1}{2} F_m [\cos(\omega_1 t + p\alpha) + \cos(\omega_1 t - p\alpha)]$$

- ▶ Cada campo giratorio dará lugar a una característica par-deslizamiento análogo a la de los motores trifásicos



$$F(\alpha, t) = F_m \cos \omega_1 t \cos p\alpha$$

$$\alpha = \omega_m t \quad \text{grados geométricos}$$

$$\theta = p\alpha \quad \text{grados magnéticos}$$

Arranque de los motores de inducción monofásicos

- ▶ En el arranque $s_d=s_i=1$ y $PAR=0$ por tanto el motor no puede despegar.
- ▶ Pero si por algún procedimiento se ayudara a girar el motor en un sentido, aparecerá par inmediatamente, que si es superior al par resistente pondrá en funcionamiento la máquina.
- ▶ Si en el motor trifásico se desconecta una fase, se tendría un funcionamiento como el del monofásico, no hay par de arranque y la potencia y par máximos se reducen, y si actuara la cara sobre el eje se produce un calentamiento en los devanado