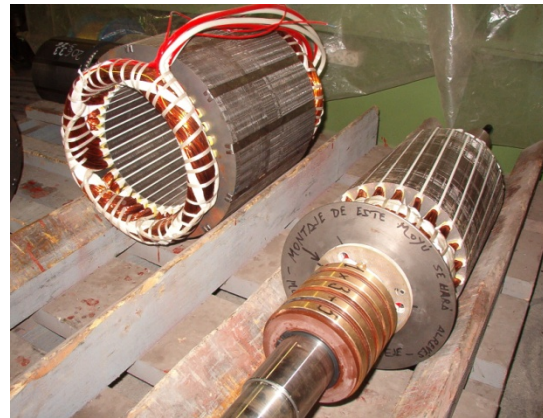


Universidad Carlos III de Madrid
Dept. Ingeniería eléctrica



Máquinas eléctricas de corriente alterna

Capítulo 2 Máquina Asíncrona



David Santos Martín



CAPÍTULO 2 Máquina Asíncrona



2.1.- Introducción

2.2.- Circuito equivalente

2.3.- Balance de Potencias

2.4.- Ensayos de la Máquina

2.4.- Curva característica par-velocidad

2.6.- Regulación de velocidad



2.1 Introducción



CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.1 Introducción



Introducción

La máquina asíncrona o de inducción se caracteriza por que la corriente del devanado inducido (normalmente rotor) se debe a la fem inducida en un circuito cerrado.

La velocidad de la máquina asíncrona no está impuesta por la red, existe un pequeño deslizamiento.

Su uso habitual es como **motor** aunque es posible como **generador** (eólica) aunque no puede regular la potencia reactiva.

Existen máquinas rotor cortocircuitado (devanado accesible) y rotor en jaula de ardilla (devanado no accesible).

Ventajas

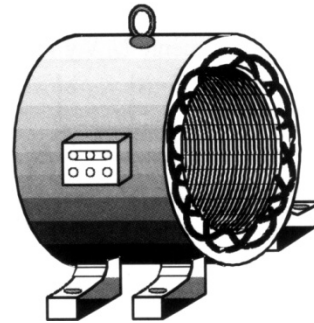
- Máquina robusta y simple (80 % de las máquinas actuales es de este tipo).
- Con el desarrollo de los accionamientos puede aplicarse, de forma económica, a sistemas de velocidad variable.

Inconvenientes

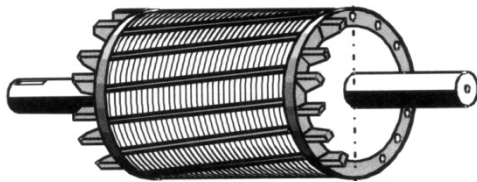
- No permite la regulación de reactiva.
- Sin elementos externos su característica par-velocidad es fija.
- La unión rígida a la frecuencia de la red puede ser un inconveniente



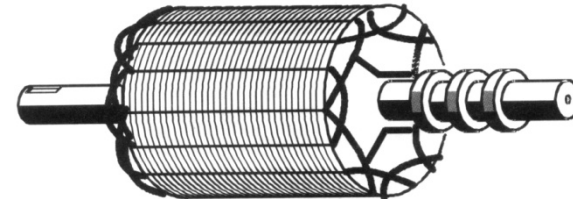
Clasificación de las máquinas de inducción



Estator



Rotor en jaula de ardilla



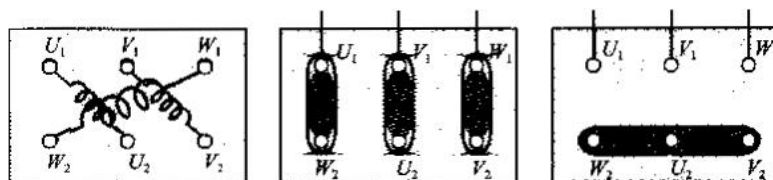
Rotor devanado o con anillos

El rotor es el inducido y es un circuito cerrado internamente (jaula de ardilla) o externamente (rotor devanado)

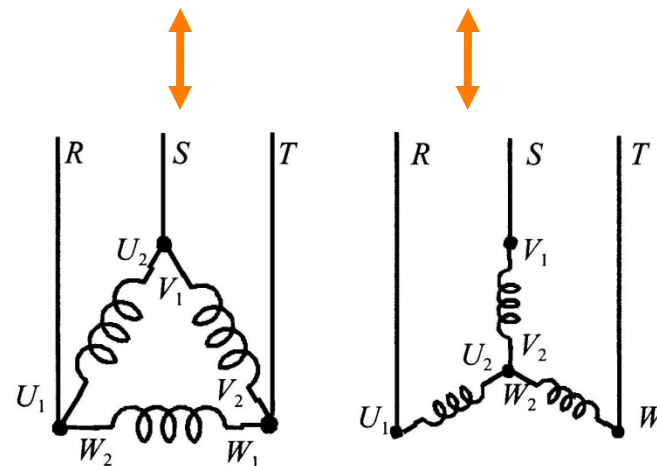


Conexión estrella-triángulo

Caja de bornas



Esquema de conexión



Triángulo

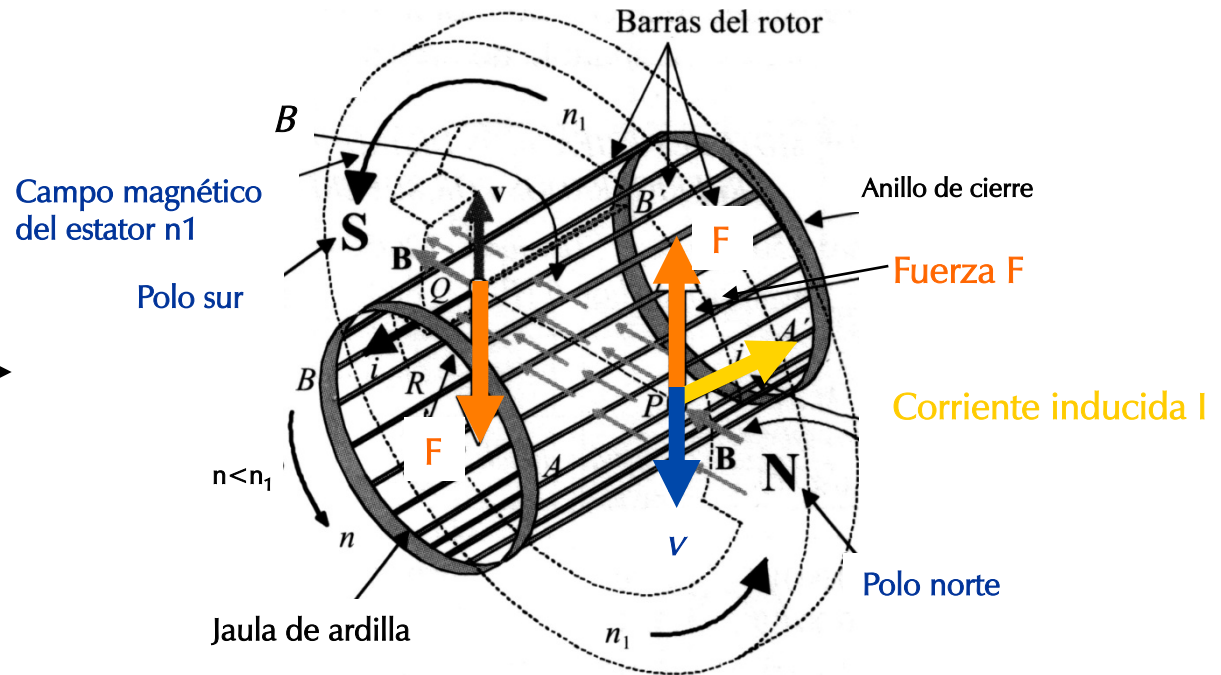
Estrella

La conexión estrella se utiliza para la tensión más elevada y el triángulo para la más baja

Principio de funcionamiento

$$e = (v \times B) \cdot \ell$$

$$f = i_s (\ell \times B)$$



Tiene que existir una velocidad relativa v entre el campo del estator y del rotor para que se produzca una fem inducida en el rotor que genere una corriente I que posibilite la existencia de una fuerza o par



CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.1 Introducción



Principio de funcionamiento

Deslizamiento

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

n: velocidad mecánica

Típico 3 – 8 %

f: frecuencia de la fem inducida

1: Estator
2: Rotor

$$E_1 = 4.44 N_1 f_1 \Phi_m k_1$$

$$E_{2s} = 4.44 N_2 f_2 \Phi_m k_2$$

N: nº de espiras

La relación de corrientes
estator y rotor

$$f_2 = s f_1$$



$$n_2 + n = n_1$$

$$E_{2s} \approx s E_1 (N_2/N_1)$$

Las ondas de fmm del
estator y rotor giran a la
misma velocidad

En el caso de un motor, éste está condenado a girar a una velocidad asíncrona, y siempre menor a la de sincronismo.

(Nota: El número de polos del estator y rotor tiene que ser igual)



CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.1 Introducción



Problema 2.13 (Motor asíncrono)

Deslizamiento

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

n: velocidad mecánica

Típico 3 – 8 %

Datos

Motor asíncrono, 50 Hz
Plena carga: $n=960$ rpm



Calcular

- Velocidad de sincronismo en rpm y rad/s
- Frecuencia de las corrientes del rotor
- Velocidad relativa del rotor respecto del campo giratorio
- Velocidad de sincronismo que le correspondería para una frecuencia de 60 Hz



CAPÍTULO 2 Máquina Asíncrona



2.2 Circuito Equivalente



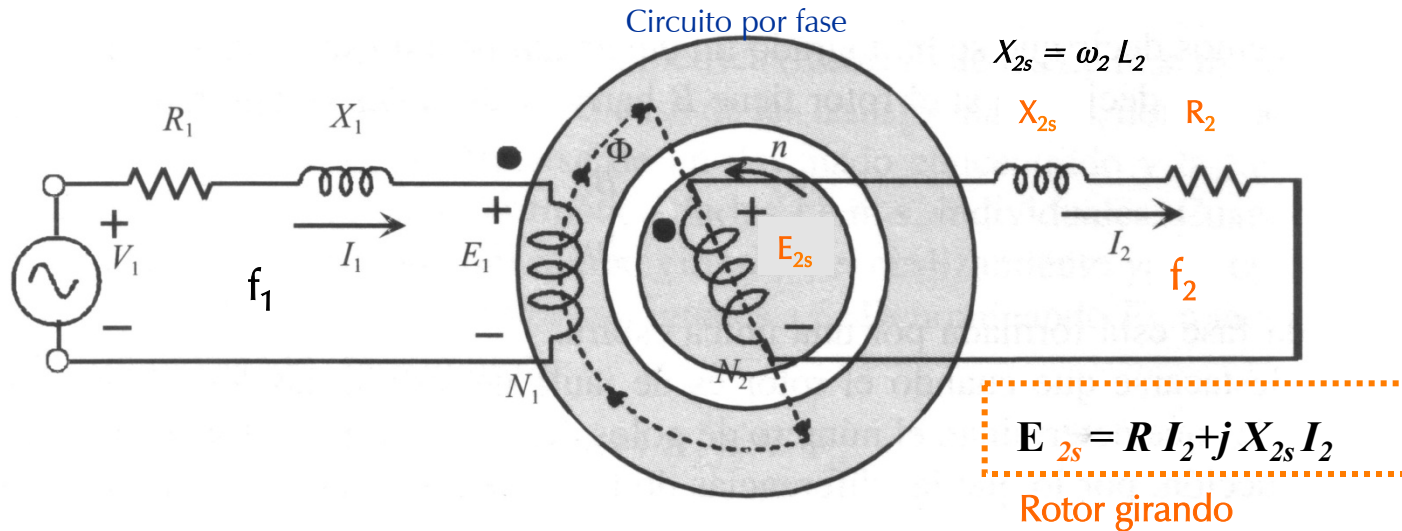
CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.2 Circuito equivalente



Circuito equivalente: introducción

1: Estator
2: Rotor



Rotor parado

$$n=0$$

$$s=1$$

$$f_2 = f_1$$



$$E_1 = 4.44 N_1 f_1 \Phi_m k_1$$

$$E_2 = 4.44 N_2 f_1 \Phi_m k_2$$

N: nº de espiras



Rotor parado

$$E_2 \approx E_1 (N_2/N_1)$$

Las ondas de fem del estator y rotor giran a la misma velocidad si $n=0$

En el circuito equivalente por fase las frecuencias del estator f_1 y del rotor f_2 son distintas

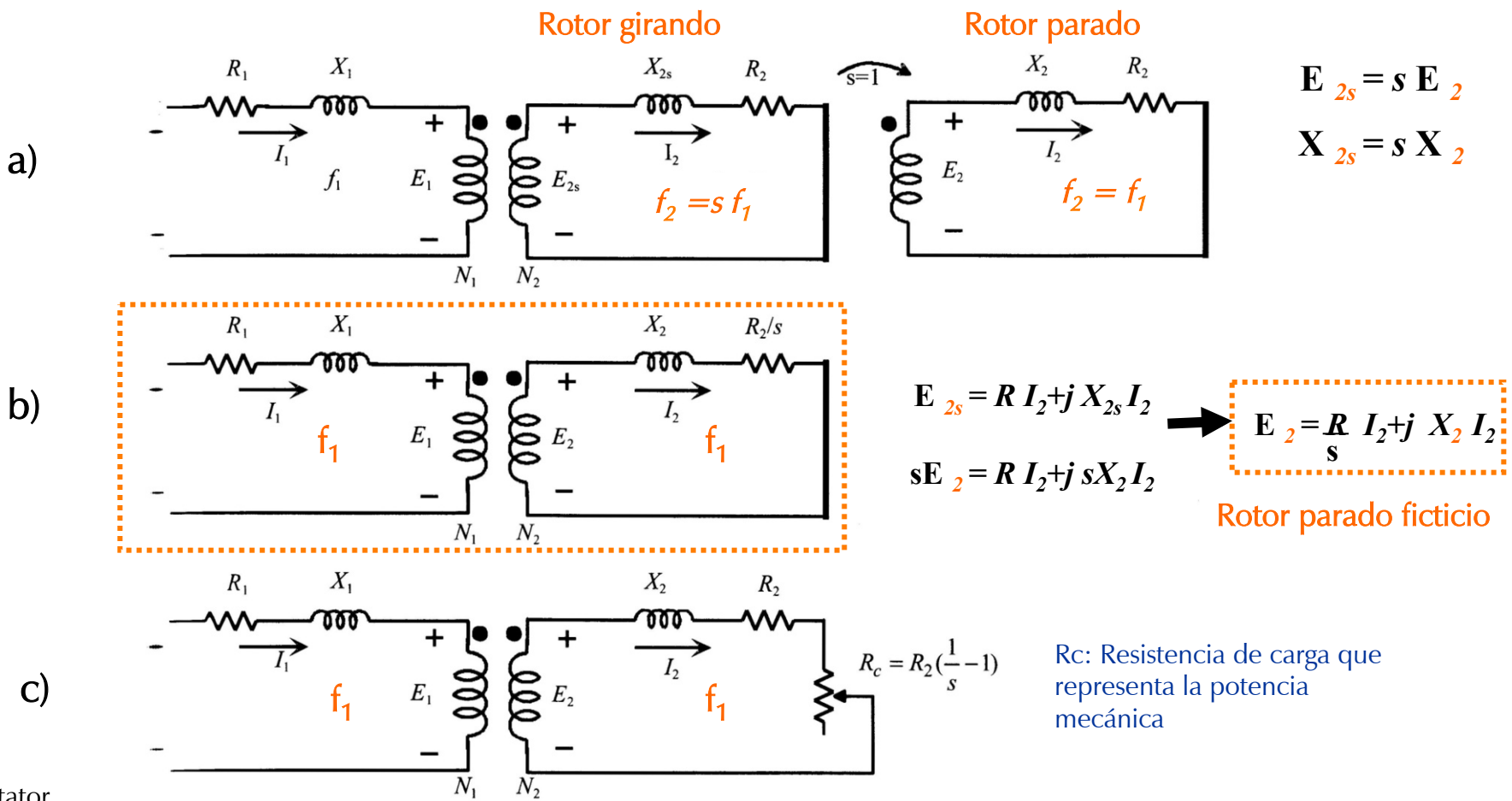


CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.2 Circuito equivalente



Circuito equivalente: desarrollo I



1: Estator
2: Rotor

En el circuito equivalente por fase las frecuencias del estator f_1 y del rotor f_2 son distintas

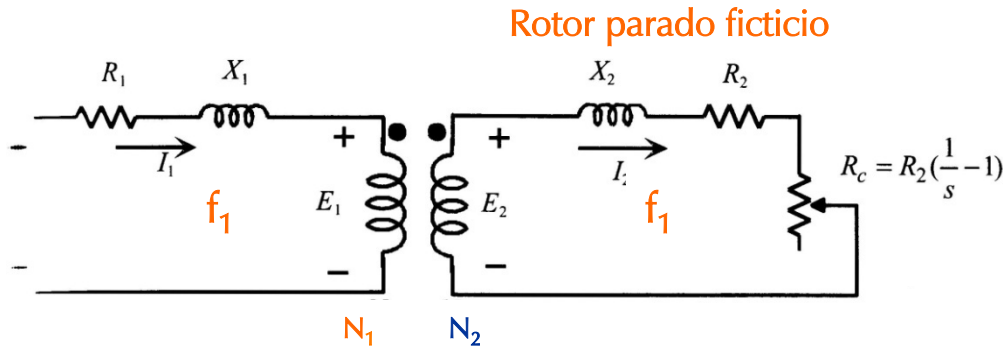


CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.2 Circuito equivalente



Circuito equivalente: desarrollo II



$$m = \frac{N_1 K_1}{N_2 K_2} \approx \frac{N_1}{N_2}$$

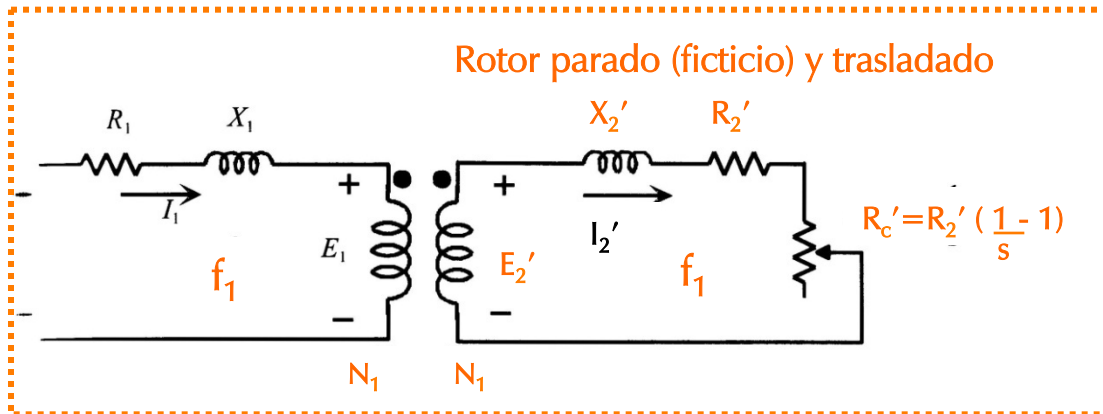


$$E_2' = m E_2 = E_1$$

$$I_2' = I_2 / m$$

$$X_2' = m^2 X_2$$

$$R_2' = m^2 R_2$$



Proyección de la referencia rotor a la ref. estator (potencia invariable)

(mismo nº de fases en estator y rotor)

- 1: Estator
- 2: Rotor

En el circuito equivalente por fase el número de espiras N_1 y N_2 son distintas, Es necesario proyectar (trasladar) el rotor en el estator mediante la relación m



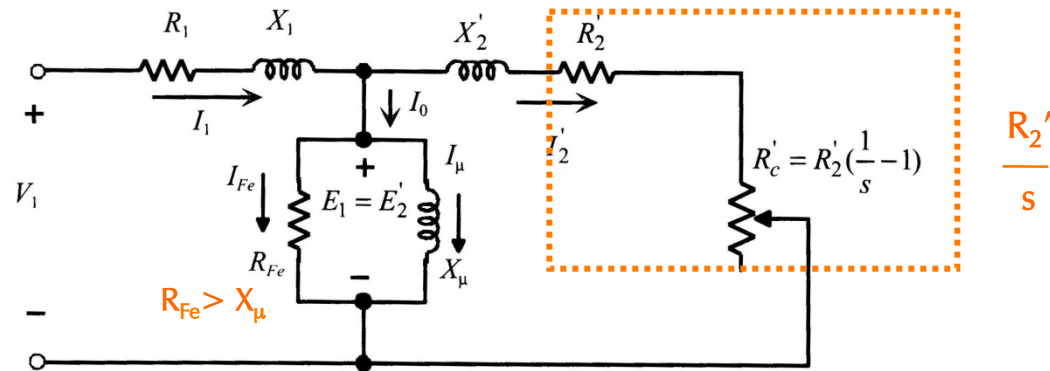
CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.2 Circuito equivalente

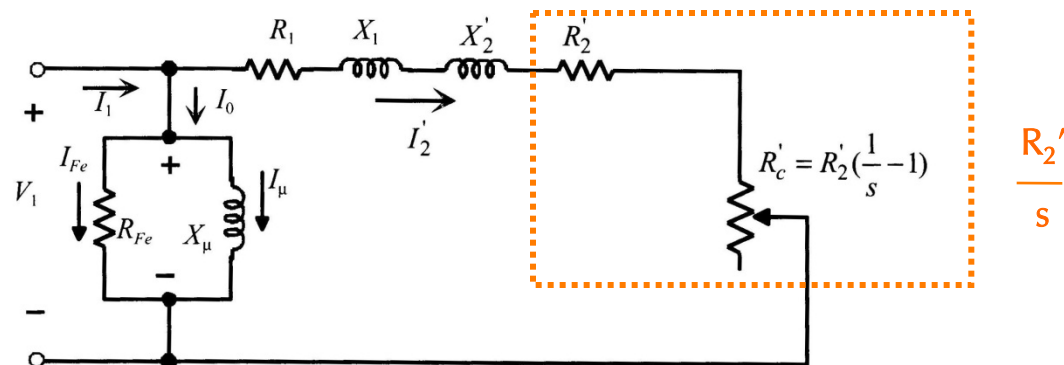


Circuito equivalente: desarrollo III

Exacto



Aproximado



- 1: Estator
- 2: Rotor

Incluyendo el deslizamiento s en R_2 se compatibilizan frecuencias, y usando m se compatibilizan diferencias de espiras N_1 y N_2 resultando un circuito ficticio a la frecuencia de sincronismo f_1 y espiras N_1

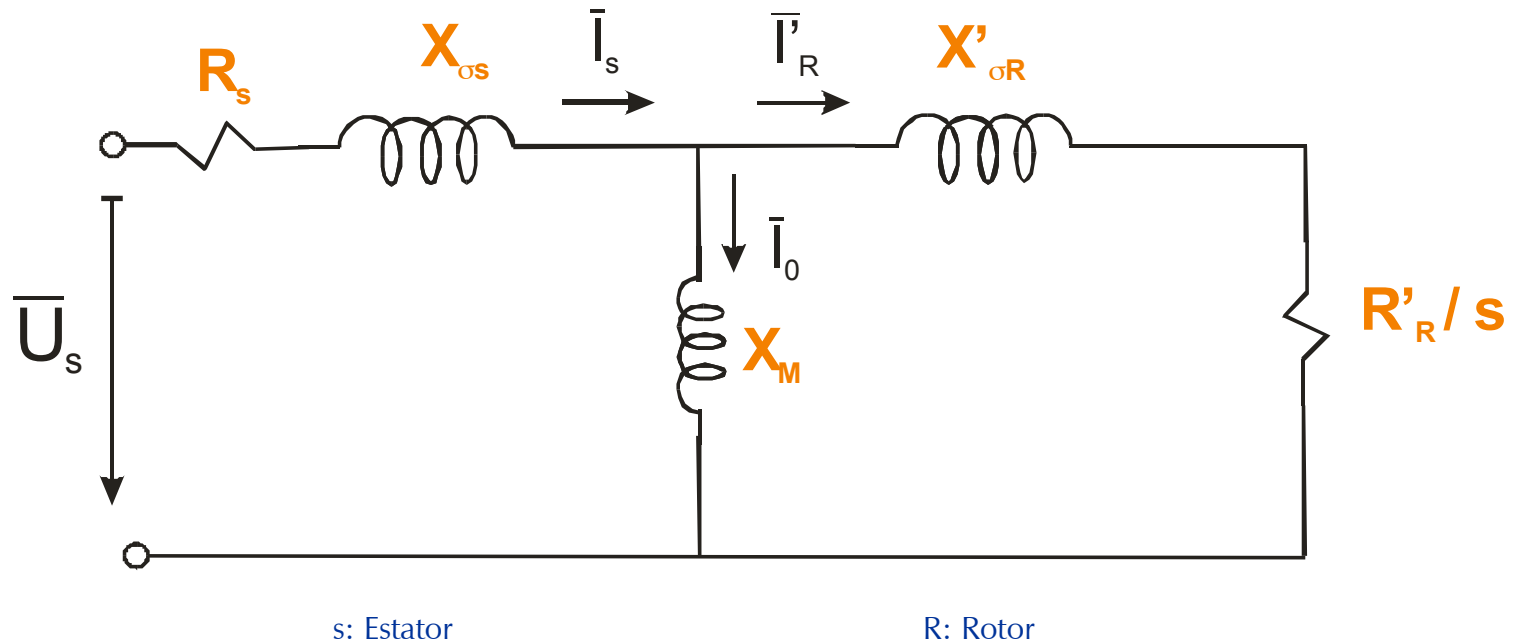


CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.2 Circuito equivalente



Circuito equivalente: desarrollo IV



Circuito equivalente despreciando las pérdidas del hierro



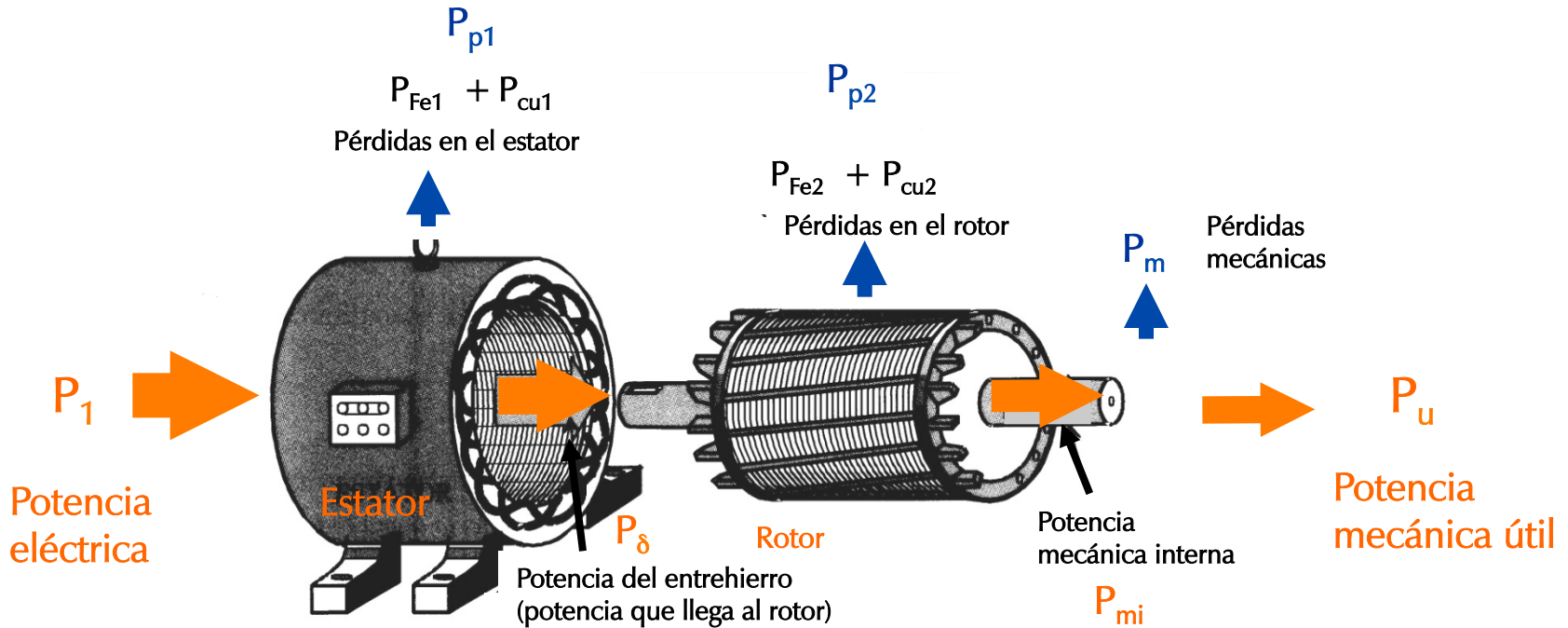
2.3 Balance de Potencias

CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.3 Balance de Potencias



Balance de potencias



El proceso de transformación de energía eléctrica (P_1) y mecánica (P_u) está inevitablemente ligado a pérdidas en los diferentes órganos

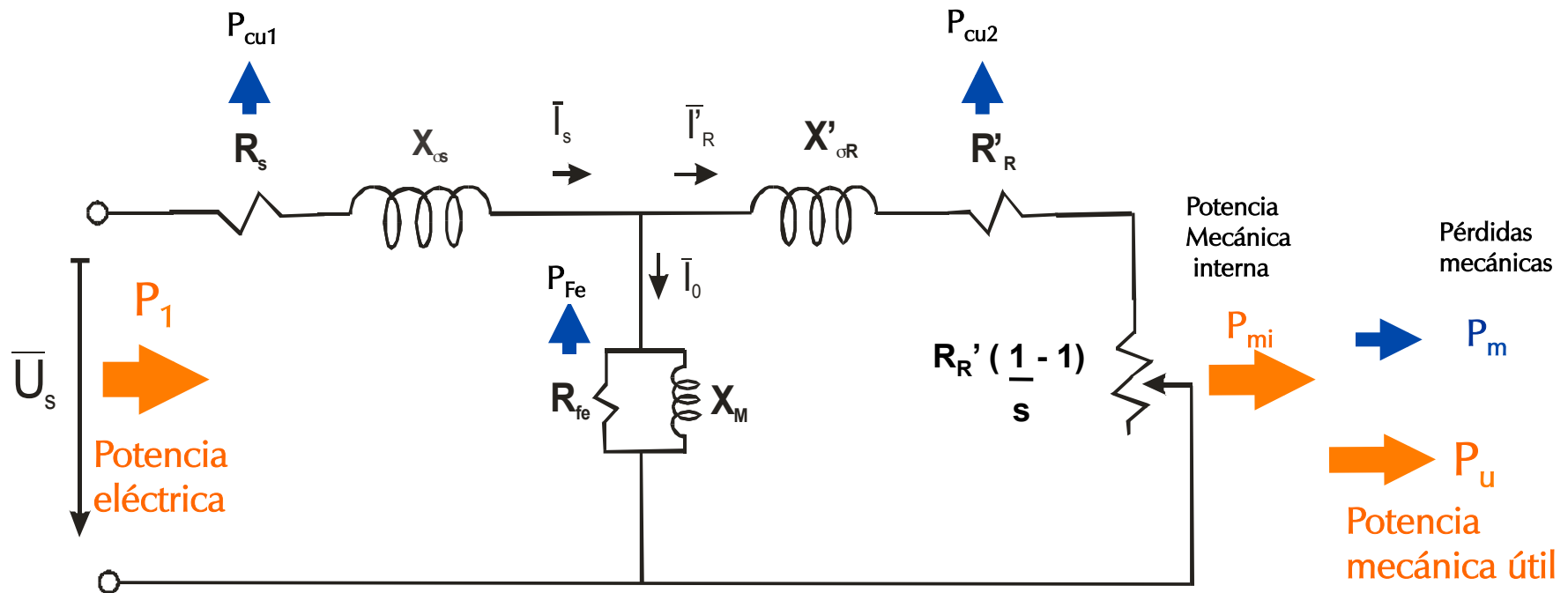


CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.3 Balance de Potencias



Balance de potencias



El circuito eléctrico de la máquina permite seguir el proceso de transformación de energía eléctrica (P_1) y mecánica (P_u) contemplando las pérdidas en los diferentes órganos



CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.3 Balance de Potencias



Balance de potencias

Potencia eléctrica

$$P_1 = 3 U_1 I_1 \cos\varphi_1$$

Potencia pérdidas
en el estator

$$P_{p1} = P_{cu1} + P_{Fe1}$$

$$P_{cu1} = 3 R_1 I_1^2$$

$$P_{Fe1} \approx 3 U_1^2 / R_{Fe}$$

Potencia del entrehierro

$$P_\delta = P_1 - P_{p1} = P_{mi} + P_{cu2} = P_{mi} / (1 - s)$$

Potencia pérdidas
en el rotor

$$P_{p2} = P_{cu2} + P_{Fe2}$$

$$P_{cu2} = 3 R_2' I_2'^2$$

$$P_{Fe2} \approx 0$$

Potencia mecánica interna

$$P_{mi} = 3 R_2' \left(\frac{1-s}{s} \right) I_2'^2$$

Potencia mecánica útil

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

Potencia de pérdidas mecánicas

$$P_m$$

Rendimiento

$$\eta = P_u / P_1$$



CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.3 Balance de Potencias



Problema 2.14 (Motor asíncrono balance de potencias)

Datos

Motor asíncrono rotor devanado, 4 polos, 50 Hz, 380 V en estrella (estator).

Rotor conectado en estrella.

Relación de transformación ($m=2.5$).

$R_1=0.5 \Omega$, $X_1=1.5 \Omega$, $R_2=0.1 \Omega$, $X_2=0.2 \Omega$,
 $R_{Fe}=360 \Omega$, $X_\mu=40 \Omega$.

Las pérdidas mecánicas son de 250 W.

El deslizamiento a plena carga $s=0.05$.



Calcular

Utilizando el circuito equivalente exacto del motor:

- I_1 (corriente del estator)
- I_2 (corriente del rotor)
- I_0 (corriente de magnetización)
- P_{fe} (pérdidas en el hierro)
- P_1 y Q_1 (potencias consumidas de la red)
- P_{mi} (potencia mecánica interna).
- P_u (potencia mecánica útil)
- Rendimiento del motor
- Corriente de arranque y su fdp
- Repetir el problema utilizando el circuito aproximado del motor



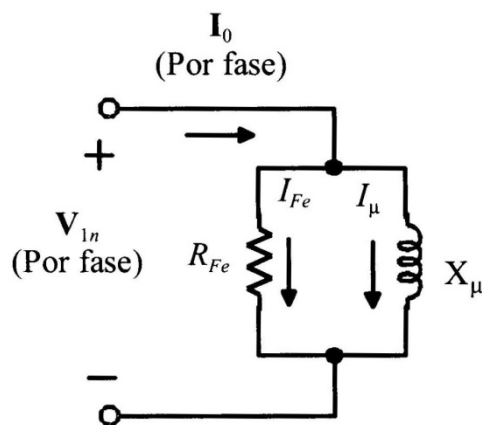
2.4 Ensayos de la Máquina

2.4 Ensayos de la máquina

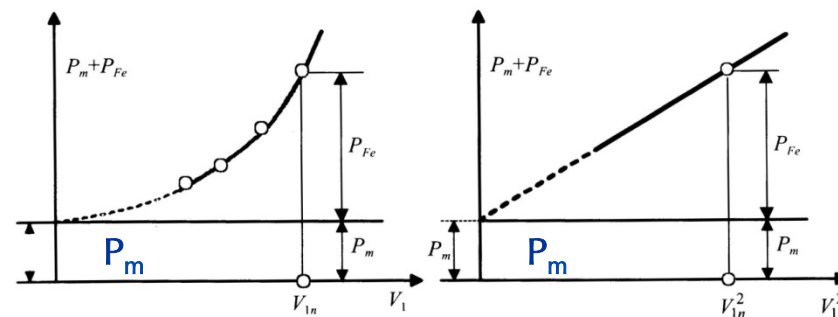
Ensayos del motor asíncrono: vacío y rotor bloqueado

Ensayo de vacío (sin carga en el eje)

La potencia de R_c' es sólo para pérdidas por lo que $I_2' \approx 0$



1) Permite calcular las pérdidas mecánicas (P_m)



$$P_0 = P_{Fe} + P_m + P_{cu1}$$

2) Permite calcular R_{Fe} y X_μ

3) R_1 se calcula con c.c entre dos fases

Los ensayos de vacío y rotor bloqueado permiten estimar los parámetros del circuito equivalente y calcular las pérdidas



CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

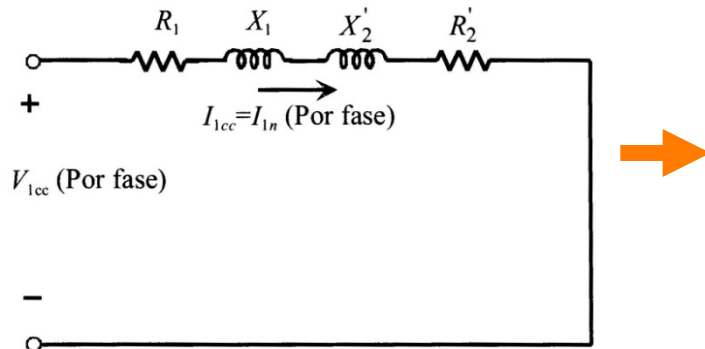
2.4 Ensayos de la máquina



Ensayos del motor asíncrono: vacío y rotor bloqueado

Ensayo de rotor bloqueado y cortocircuito ($n=0, s=1$)

La $Z_{\mu} \gg R_2'$ por lo que casi toda la corriente I_1 se deriva por el rotor $I_2' \approx I_1$



1) Mediante la potencia activa consumida se puede calcular $R_1 + R_2'$

2) Mediante la potencia reactiva consumida se puede calcular $X_1 + X_2'$ (casi siempre $X_1 \approx X_2'$)

Nota: La norma IEEE 112 recomienda ensayar a 25% de f_1 (el rotor siempre tiene baja frecuencia y el estator alta) y corregir los valores obtenidos (X_1 y X_2') multiplicándolos por $f_{\text{nominal}}/f_{\text{ensayo}}$

Los ensayos de vacío y rotor bloqueado permiten estimar los parámetros del circuito equivalente y calcular las pérdidas



CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.4 Ensayos de la máquina



Problema 2.15 (Motor asíncrono ensayo de vacío y rotor bloqueado)

Datos

Motor asíncrono, 22 kW, 50 Hz, 380 V, 4 polos, 1449 rpm.

Ensayo de vacío en triángulo da:

1ª) $U_0=380$ V, $I_0=16.4$ A, $P_0=620$ W

2ª) $U_0=190$ V, $I_0=14.5$ A, $P_0=410$ W

Ensayo con rotor bloqueado (20 Hz):

$U_{rb}=37.3$ V, $I_0=46.2$ A, $P_{rb}=2068$ W

Ensayo con c.c.:

Resistencia entre 2 terminales fue 0.28Ω

Calcular

- a) Obtener los parámetros del circuito equivalente completo sabiendo que el motor es de tipo Nema A
($X_{\sigma S} = X_{\sigma R}$)



2.5 Curva Característica par-velocidad

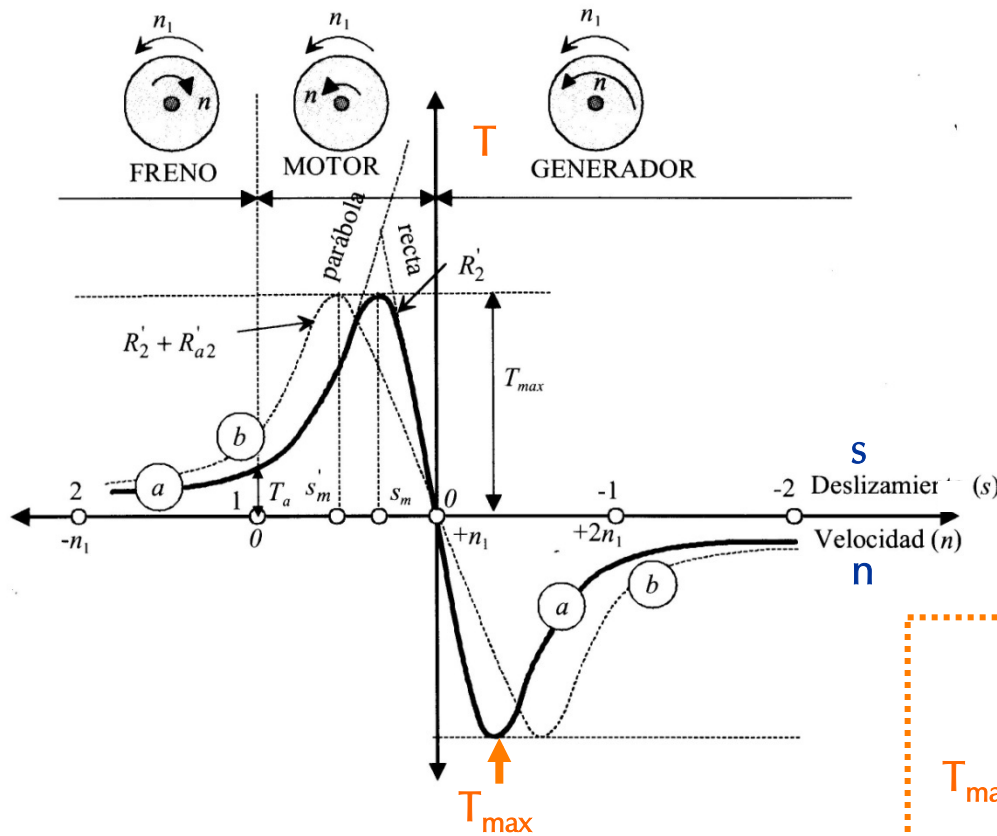


CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.5 Curva característica par-velocidad



Característica par-velocidad



m_1 : nº de fases del estator
 $X_{cc} = X_1 + X_2'$

$$T = \frac{P_u}{\Omega} \approx \frac{P_\delta}{\Omega_1} \quad P_m \approx 0$$

$$T = \frac{m_1 \frac{R_2'}{s} V_1^2}{2\pi \frac{n_1}{60} \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{cc}^2 \right]}$$

$$T_{\max} = \pm \frac{n_1^2 V_1^2}{2\pi \frac{n_1}{60} 2 \left[\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2} \right]}$$

$$\frac{dT}{ds} = 0 \Rightarrow s_m = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2}}$$

Esta curva define el punto de trabajo en régimen permanente de la máquina en función de sus parámetros



2.6 Regulación de velocidad



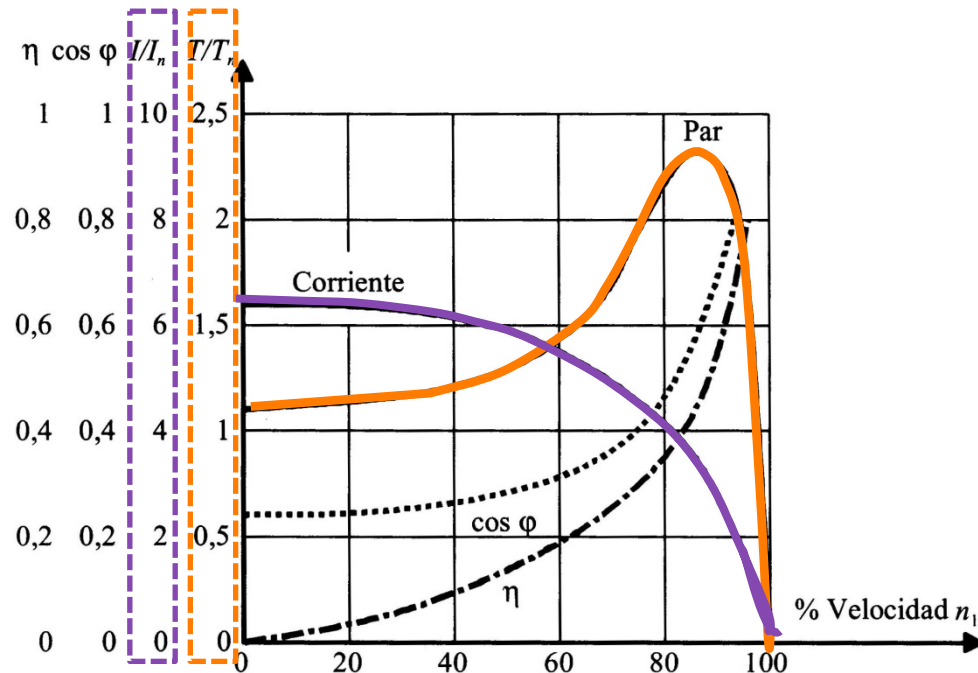
CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.6 Regulación de velocidad



Arranque

- Se precisa que el par de arranque sea superior al par resistente, para que exista aceleración.
- En el arranque se producen corrientes elevadas al ser la resistencia de carga R'_c nula ($s=1$)



Para reducir las corrientes en el momento de la puesta en marcha se emplean métodos especiales de arranque



CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.6 Regulación de velocidad



Métodos de arranque

- 1) Arranque directo
- 2) Arranque por autotransformador
- 3) Arranque con conmutación estrella triángulo
- 4) Con arrancador estático
- 5) Arranque de los motores de rotor bobinado

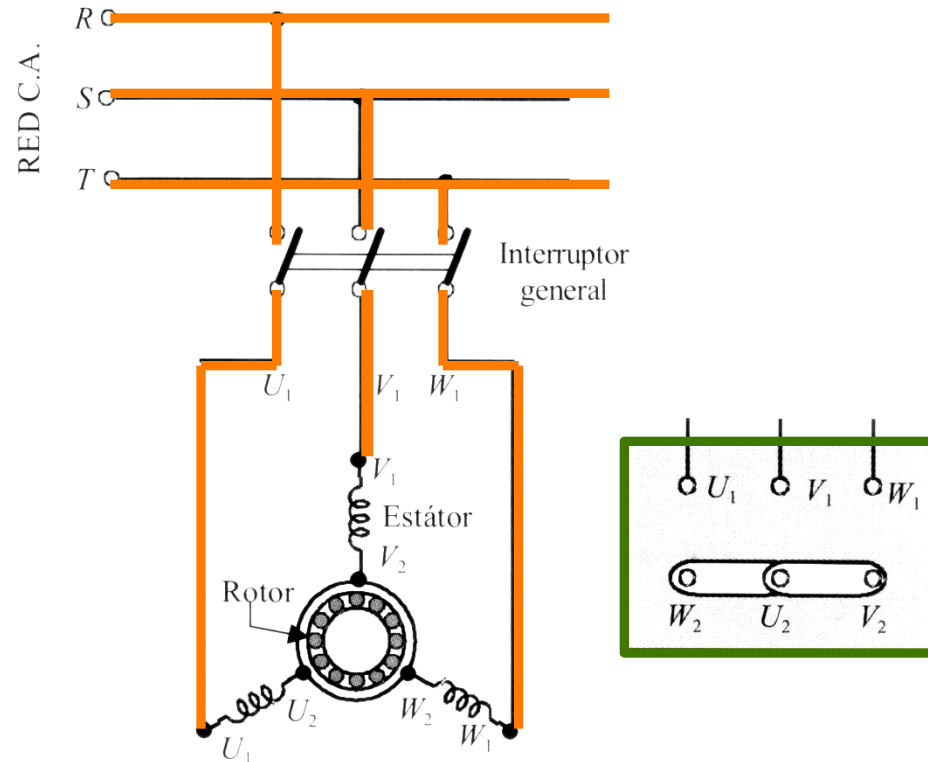
Para reducir las corrientes en el momento de la puesta en marcha se emplean métodos especiales de arranque

CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.6 Regulación de velocidad



Arranque directo



Se emplea únicamente en motores de pequeña potencia.
En grandes fábricas recibiendo tensión en A.T. y con subestación transformadora se puede llegar a arranques directos de motores de hasta 75 kW.

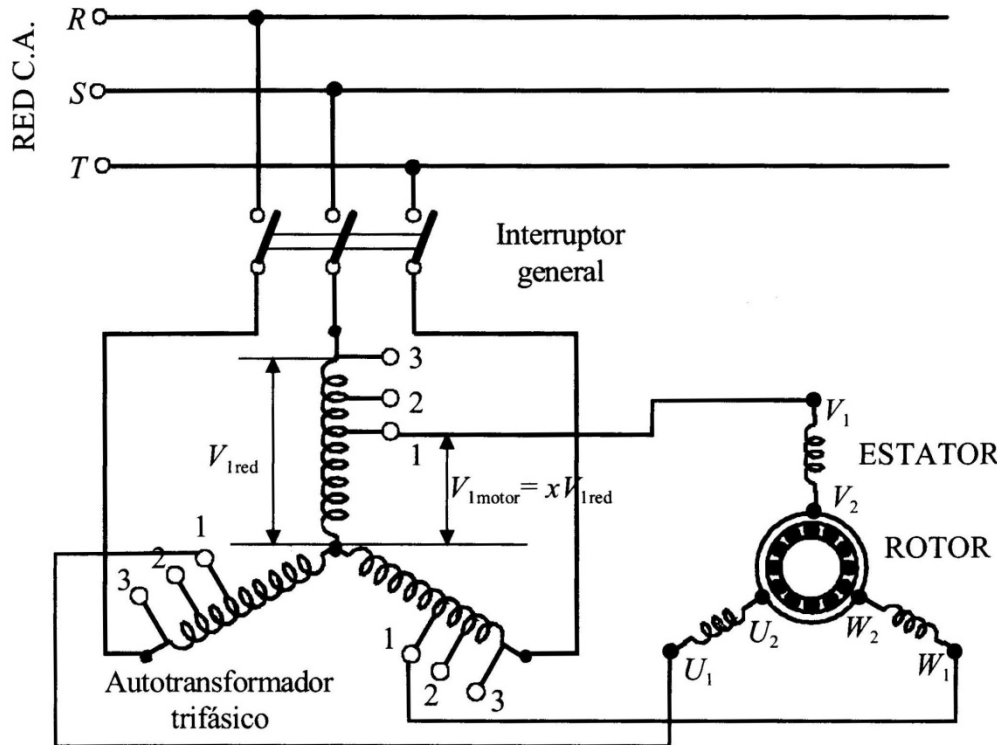


CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.6 Regulación de velocidad



Arranque por autotransformador



$$x = p.u \text{ del autotrafo}$$

$$V_{motor} = x V_{red}$$

$$I_{motor} = x I_{cc}$$

$$T_{aut} = x^2 T_{direc}$$

aut: con autotrafo

direc: con arranque directo

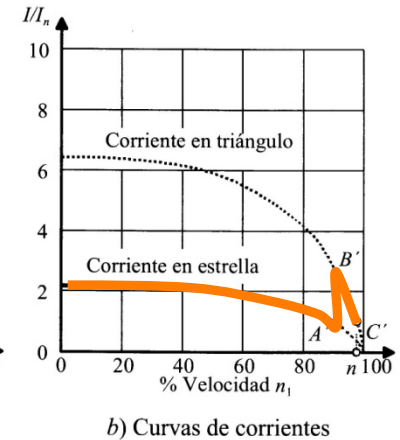
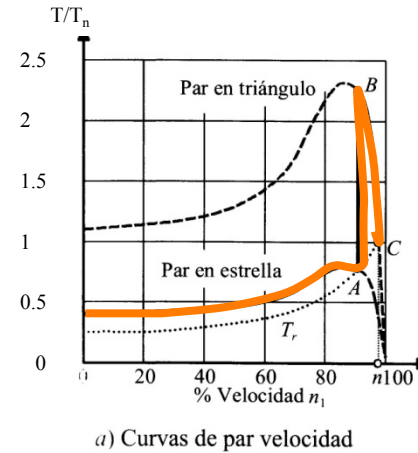
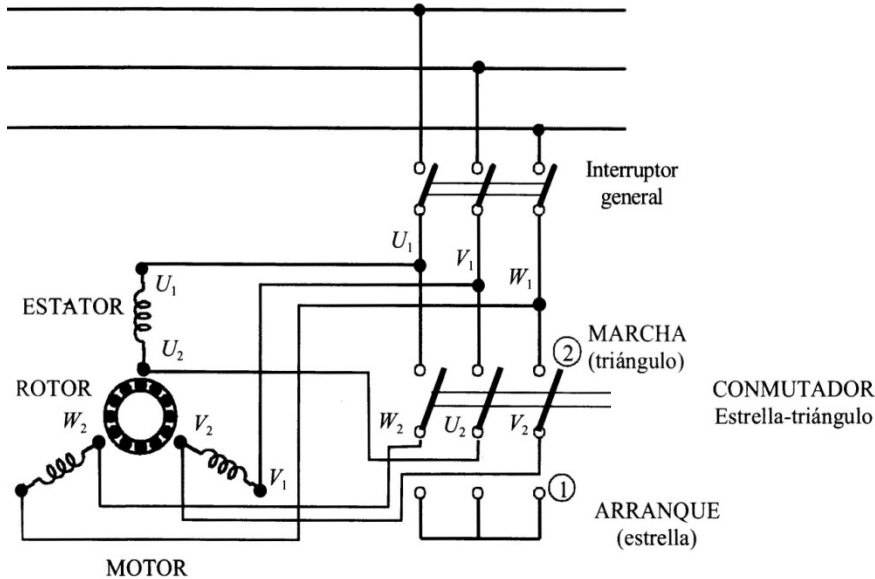
Sólo es posible cuando el par resistente de la carga no sea muy elevado, pues el par se reduce con el cuadrado de la tensión.

CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.6 Regulación de velocidad



Arranque con conmutación estrella-triángulo



$$T_{a\lambda} = 1/3 T_a$$

$$I_{a\lambda} = 1/3 I_{cc}$$

λ : conexión en estrella
 a : conexión en triángulo

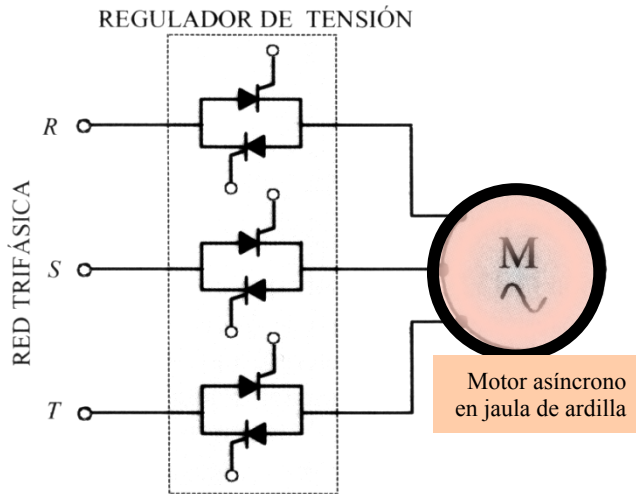
Este método sólo se puede utilizar en aquellos motores que estén preparados para funcionar en triángulo y tengan un par resistente pequeño.
 La máquina se arranca en estrella y se conmuta a triángulo una vez alcanzada una velocidad estable.

CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

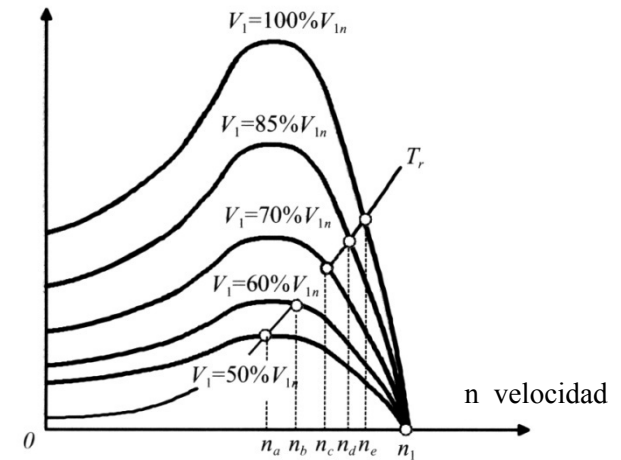
2.6 Regulación de velocidad



Con arrancador estático



T Par motor



Este método trabaja bajo el principio de reducción de tensión estática de forma continua, modificando la característica par-velocidad y la de corriente-velocidad

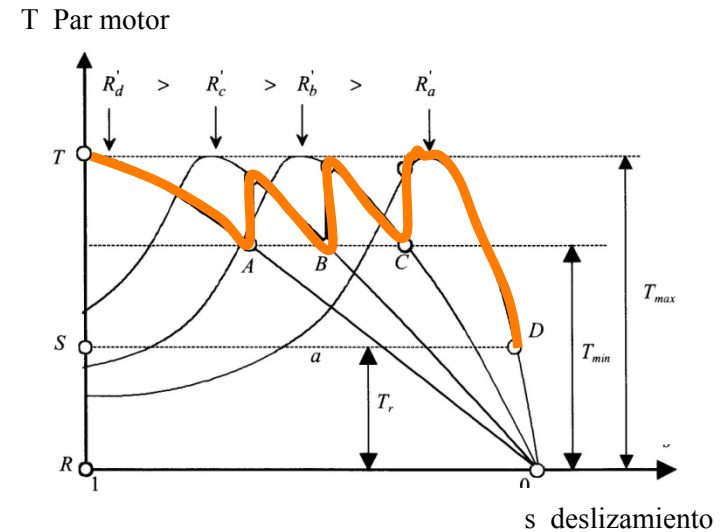
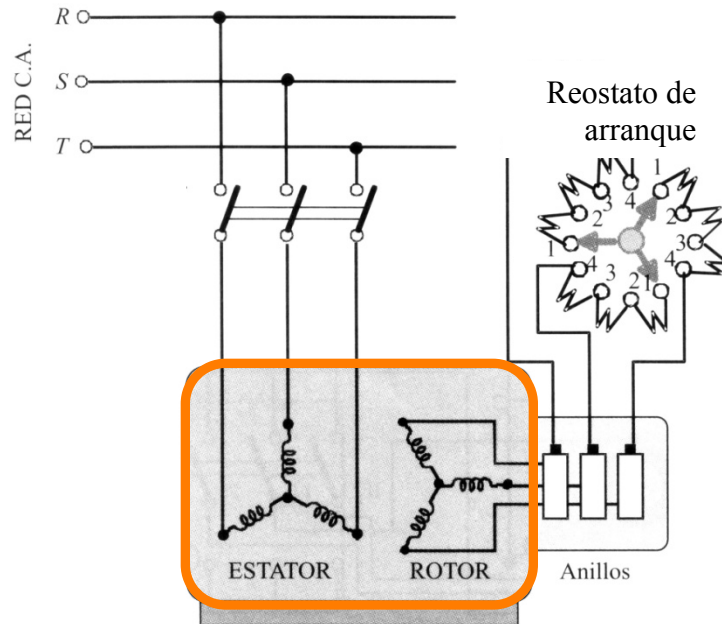


CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.6 Regulación de velocidad



Arranque de los motores de rotor bobinado mediante inserción de resistencias rotóricas



Se arranca la máquina introduciendo toda la resistencia (1) aumentando la impedancia de la máquina y reduciendo la corriente inicial. Al final (4) queda cortocircuitado el rotor.



CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.6 Regulación de velocidad



Frenado

Para parar el motor rápidamente se puede realizar por procedimientos mecánicos (rozamiento) o eléctricos. En el caso de frenado eléctrico el motor pasa a funcionar como generador.

1) Frenado regenerativo o por recuperación de energía

Este fenómeno se produce de forma espontánea cuando la velocidad supera la velocidad de sincronismo y la máquina se pone a generar. (se controla la sobrevelocidad pero no se para la máquina).

Para reducir la velocidad se conecta: a) un generador con dos velocidades (Dahlander) o b) un convertidor a frecuencia variable.

2) Frenado por contracorriente

Cuando al motor se le invierten 2 fases, éste pasa a estar alimentado por un sistema de secuencia inversa, cambiando la frecuencia de sincronismo de ω_1 a $-\omega_1$, y la máquina de motor a generador. Para pararlo habrá que enclavarlo en el paso por velocidad nula.

3) Frenado dinámico por inyección de corriente continua

Se produce un campo continuo en el entrehierro que visto desde el rotor el deslizamiento es 1- s , similar a un arranque directo, tendiendo el par electromagnético a igualar las velocidades de los campos estatórico y rotórico, y por lo tanto frenando el rotor.



CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.6 Regulación de velocidad



Regulación de velocidad

El motor de inducción tiene una característica par-velocidad, cuya zona de trabajo estable es muy “rígida” (casi nula variación de velocidad). Para competir con los motores de continua se han desarrollado sistemas que permitan su regulación de velocidad.

1) Regulación por variación del número de polos

Variando el número de polos del estator de la máquina, cambia la velocidad del campo giratorio y en consecuencia varía la velocidad de rotación del rotor (se usan varios devanados). Es preciso que el rotor sea jaula de ardilla para que el rotor se adapte automáticamente al número de polos del estator. La conexión Dahlander emplea dos escalones de velocidad, relación 2:1, y con un solo devanado.

2) Regulación por variación del deslizamiento

- Se puede variar el deslizamiento controlando la tensión aplicada, pero no es aconsejable pues resulta afectado el par (este varía con el cuadrado de la tensión).
- También se puede variar el deslizamiento introduciendo resistencias en el rotor (rotor devanado), pero tiene grandes pérdidas.
- El sistema más empleado es aplicar una tensión al rotor controlada con un convertidor de electrónica de potencia (generador asíncrono doblemente alimentado).

3) Regulación por variación en la frecuencia (conv. electrónico)

Este sistema se utiliza hoy en día con convertidores electrónicos, que controlan la frecuencia y el flujo (control escalar) de la máquina para conservar el par (relación V/f constante).

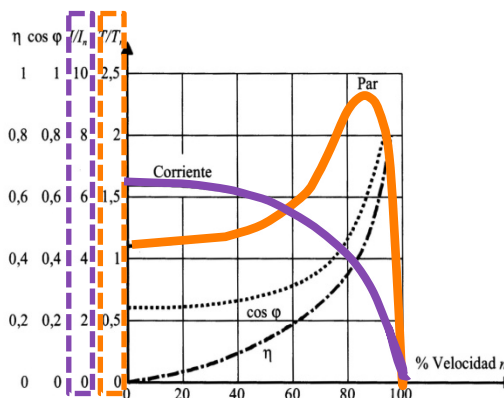


CAPÍTULO 2 Máquinas Asíncronas

2.6 Regulación de velocidad



Problema 3.1 (Motor asíncrono: arranque)



Datos

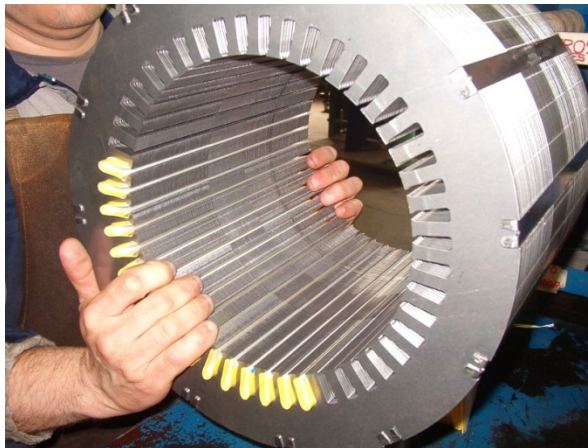
Motor asíncrono trifásico 50 Hz
 $R_1 = R_2' = 0.5 \Omega$, $X_{cc} = 5\Omega$
 $T_{\max}/T_{\text{nominal}} = 2.2$



Calcular

La relación entre el par de arranque y el par nominal en los siguientes casos:

- Arranque directo
- Arranque por transformador
- Arranque estrella-triángulo



Máquinas Eléctricas de Corriente Alterna | David Santos