



MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Proyecto

"SELECCIÓN DE UN MOTOR ELÉCTRICO"

Autor

LUYO RODRÍGUEZ, César Augusto

2007 - II

Introducción

Los motores eléctricos están presentes en, prácticamente, cualquier rincón de una casa. Los encontramos en electrodomésticos, como una batidora, una lavadora o un lector de CD, pero también están en aparatos donde no se manifiesta de un modo directo la existencia de un movimiento de giro, como es el caso de un frigorífico, una aspiradora o una puerta automática.

El movimiento producido por el motor eléctrico tiene su origen en el uso del magnetismo. Si has jugado alguna vez con un par de imanes, habrás comprobado que existen zonas o áreas donde se "concentra la acción magnética", a las cuales se denomina polos magnéticos. Seguro que, con asombro, también habrás comprobado cómo dos imanes pueden atraerse (al enfrentar polos de distinto signo) o repelerse fuertemente (al enfrentar polos iguales). El movimiento de giro de un motor nace, precisamente, de la presencia de estas fuerzas de atracción y repulsión magnética.

Para que esta atracción y repulsión magnética se transformen en movimiento es necesario utilizar un tipo especial de imanes conocidos como "electroimanes", los cuales funcionan gracias a la acción de una corriente eléctrica.

Motores Eléctricos

Fundamento Teórico

Los motores eléctricos son máquinas eléctricas rotatorias que transforman la energía eléctrica en energía mecánica. Debido a sus múltiples ventajas, entre las que cabe citar su economía, limpieza, comodidad y seguridad de funcionamiento, el motor eléctrico ha reemplazado en gran parte a otras fuentes de energía, tanto en la industria como en el transporte, las minas, el comercio, o el hogar.

Los motores eléctricos satisfacen una amplia gama de necesidades de servicio, desde arrancar, acelerar, mover, o frenar, hasta sostener y detener una carga. Estos motores se fabrican en potencias que varían desde una pequeña fracción de caballo hasta varios miles, y con una amplia variedad de velocidades, que pueden ser fijas, ajustables o variables.

Un motor eléctrico contiene un número mucho más pequeño de piezas mecánicas que un motor de combustión interna o uno de una máquina de vapor, por lo que es menos propenso a los fallos. Los motores eléctricos son los más ágiles de todos en lo que respecta a variación de potencia y pueden pasar instantáneamente desde la posición de reposo a la de funcionamiento al máximo. Su tamaño es más reducido y pueden desarrollarse sistemas para manejar las ruedas desde un único motor, como en los automóviles.

El uso de los motores eléctricos se ha generalizado a todos los campos de la actividad humana desde que sustituyeran en la mayoría de sus aplicaciones a las máquinas de vapor. Existen motores eléctricos de las más variadas dimensiones, desde los pequeños motores fraccionarios empleados en pequeños instrumentos hasta potentes sistemas que generan miles de caballos de fuerza, como los de las grandes locomotoras eléctricas

En cuanto a los tipos de motores eléctricos genéricamente se distinguen motores monofásicos, que contienen un juego simple de bobinas en el estator, y polifásicos, que mantienen dos, tres o más conjuntos de bobinas dispuestas en círculo.

Según la naturaleza de la corriente eléctrica transformada, los motores eléctricos se clasifican en motores de corriente continua, también denominada directa, motores de corriente alterna, que, a su vez, se agrupan, según su sistema de funcionamiento, en motores de inducción, motores sincrónicos y motores de colector. Tanto unos como otros disponen de todos los elementos comunes a las máquinas rotativas electromagnéticas

Motores de corriente continua

La conversión de energía en un motor eléctrico se debe a la interacción entre una corriente eléctrica y un campo magnético. Un campo magnético, que se forma entre los dos polos opuestos de un imán, es una región donde se ejerce una fuerza sobre determinados metales o sobre otros campos magnéticos. Un motor eléctrico aprovecha este tipo de fuerza para hacer girar un eje, transformándose así la energía eléctrica en movimiento mecánico.

Los dos componentes básicos de todo motor eléctrico son el rotor y el estator. El rotor es una pieza giratoria, un electroimán móvil, con varios salientes laterales, que llevan cada uno a su alrededor un bobinado por el que pasa la corriente eléctrica. El estator, situado alrededor del rotor, es un electroimán fijo, cubierto con un aislante. Al igual que el rotor, dispone de una serie de salientes con bobinados eléctricos por los que circula la corriente.

Cuando se introduce una espira de hilo de cobre en un campo magnético y se conecta a una batería, la corriente pasa en un sentido por uno de sus lados y en sentido contrario por el lado opuesto. Así, sobre los dos lados de la espira se ejerce una fuerza, en uno de ellos hacia arriba y en el otro hacia abajo. Si la espira de hilo va montada sobre el eje metálico, empieza a dar vueltas hasta alcanzar la posición vertical. Entonces, en esta posición, cada uno de los hilos se encuentra situado en el medio entre los dos polos, y la espira queda retenida.

Para que la espira siga girando después de alcanzar la posición vertical, es necesario invertir el sentido de circulación de i_a corriente. Para conseguirlo, se emplea un conmutador o colector, que en el motor eléctrico más simple, el motor de corriente continua, está formado por dos chapas de metal con forma de media luna, que se sitúan sin tocarse, como las dos mitades de un anillo, y que se denominan delgas. Los dos extremos de la espira se conectan a las dos medias lunas. Dos conexiones fijas, unidas al bastidor del motor y llamadas escobillas, hacen contacto con cada una de las delgas del colector, de forma que, al girar la armadura, las escobillas contactan primero con una delga y después con la otra.

Cuando la corriente eléctrica pasa por el circuito, la armadura empieza a girar y la rotación dura hasta que la espira alcanza la posición vertical. Al girar las delgas del colector con la espira, cada media vuelta se invierte el sentido de circulación de la corriente eléctrica. Esto quiere decir que la parte de la espira que hasta ese momento recibía la fuerza hacia arriba, ahora la recibe hacia abajo, y la otra parte al contrario. De esta manera la espira realiza otra media vuelta y el proceso se repite mientras gira la armadura.

El esquema descrito corresponde a un motor de corriente continua, el más simple dentro de los motores eléctricos, pero que reúne los principios fundamentales de este tipo de motores.

Motores de corriente alterna

Los motores de corriente alterna tienen una estructura similar, con pequeñas variaciones en la fabricación de los bobinados y del conmutador del rotor. Según su sistema de funcionamiento, se clasifican en motores sincrónicos, motores de colector y motores de inducción.

Motores sincrónicos

Los motores sincrónicos funcionan a una velocidad sincrónica fija proporcional a la frecuencia de la corriente alterna aplicada. Su construcción es semejante a la de los alternadores. Cuando un motor sincrónico funciona a potencia constante y sobreexcitado, la corriente absorbida por éste presenta, respecto a la tensión aplicada un ángulo de desfase en avance que aumenta con la corriente de excitación. Esta propiedad es la que ha mantenido la utilización del motor sincrónico en el campo industrial, pese a ser el motor de inducción más simple, más económico y de cómodo arranque, ya que con un motor sincrónico se puede compensar un bajo factor de potencia en la instalación al suministrar aquél la corriente reactiva, de igual manera que un condensador conectado a la red.

Motores de colector

El problema de la regulación de la velocidad en los motores de corriente alterna y la mejora del factor de potencia han sido resueltos de manera adecuada con los motores de corriente alterna de colector. Según el número de fases de las corrientes alternas para los que están concebidos los motores de colector se clasifican en monofásicos y Polifásicos, siendo los primeros los más utilizados. Los motores monofásicos de colector más utilizados son los motores serie y los motores de repulsión.

Motores de inducción

El motor de inducción no necesita escobillas ni colector. Su armadura es de placas de metal magnetizable. El sentido alterno de circulación, de la corriente en las espiras del estator genera un campo magnético giratorio que arrastra las placas de metal magnetizable, y las hace girar. El motor de inducción es el motor de corriente alterna más utilizado, debido a su fortaleza y sencillez de construcción, buen rendimiento y bajo coste así como a la ausencia de colector y al hecho de que sus características de funcionamiento se adaptan bien a una marcha a velocidad constante.

Los motores asíncronos (MA) o de inducción son máquinas eléctricas, las cuales han tenido mayor aplicación en la industria y artefactos electrodomésticos. Estas máquinas son los principales convertidores de energía eléctrica en mecánica (actualmente los MA consumen casi la mitad de la energía eléctrica generada). Su uso es, principalmente, en calidad de mando eléctrico en la mayoría de los mecanismos, ello se justifica por la sencillez de su fabricación, su alta confiabilidad y un alto valor de eficiencia.

Hay 2 tipos de MA; los de rotor de jaula de ardilla y los de rotor de anillos rozantes.

Principio de Funcionamiento

En el MA se tiene 2 devanados, uno se coloca en el estator y el otro en el rotor. Entre el estator y rotor se tiene un entrehierro, cuya longitud se trata de, en lo posible, hacerlo pequeño ($s = 0.1 - 0.3$ mm), con lo que se logra mejorar el acople magnético entre los devanados.

A partir de ahora, salvo indicación en sentido contrario, en este texto nos referiremos a las máquinas asíncronas **polifásicas** (normalmente **trifásicas**), las utilizadas más frecuentemente. Se denomina m_1 al número de fases del estator y m_2 al número de fases del rotor.

En este tipo de máquina el bobinado del estator está recorrido por un sistema equilibrado de corrientes que da lugar, en virtud del Teorema de Ferraris, a un campo magnético giratorio cuya velocidad es la conocida como **velocidad de sincronismo**. Cuando esta velocidad se mide en r.p.m. se la denomina n_1 y se calcula a partir de la frecuencia f_1 de las corrientes del estator mediante este cociente:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p_1} \dots\dots\dots 1$$

Como el rotor gira a una velocidad diferente de la del campo magnético del estator, sus bobinas están sometidas a la acción de un flujo magnético variable y se inducen f.e.m.s de rotación en ellas. El devanado del rotor está en cortocircuito, luego estas f.e.m.s producen la circulación de corrientes en el rotor que, al interactuar con el campo magnético del estator, originan un par en el eje de la máquina. Por la Ley de Lenz, este par mecánico intentará reducir las variaciones de flujo magnético en el devanado del rotor y, por lo tanto, tratará de hacerlo girar a la misma velocidad que el campo magnético giratorio (ya que las variaciones de flujo en las bobinas del rotor son debidas al movimiento relativo del campo giratorio con respecto al rotor), pero sin

conseguirlo nunca, ya que entonces no habría corrientes en el rotor ni, por consiguiente, par en el eje de la máquina.

La velocidad de estas máquinas es, pues, ligeramente distinta de la de sincronismo, de ahí su nombre de asíncronas. Por otra parte, las corrientes que circulan por el rotor aparecen por inducción electromagnética, de ahí su otro nombre de máquinas de inducción.

Cuando la máquina actúa como motor, su funcionamiento más habitual, la velocidad del rotor es inferior a la de sincronismo y se genera un par motor. Para que esta máquina actúe como generador es preciso moverla con una máquina motriz externa de forma que su velocidad supere a la de sincronismo. En este caso aparece un par de frenado en su eje.

Se denomina **deslizamiento s** a la siguiente relación:

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1} \dots\dots\dots 2$$

Donde:

- n₁**: es la velocidad de sincronismo medida en r.p.m.
- Ω₁**: es la velocidad de sincronismo medida en rad/s
- n**: es la velocidad de giro del rotor medida en r.p.m.
- Ω**: es la velocidad de giro del rotor medida en rad/s

Los conductores del devanado rotórico ven girar el campo originado por el bobinado del estator con una velocidad relativa n₂

$$n_2 = n_1 - n = s \times n_1 \dots\dots\dots 3$$

En consecuencia, como este campo magnético tiene p (pares de polos), sucede que un conductor del rotor en un minuto ha visto pasar frente a él n₂.p ciclos magnéticos (cada par de polos constituye un ciclo de la onda del campo magnético en el entrehierro, la cual se va repitiendo en el siguiente par de polos y así sucesivamente en todos los pares de polos de la máquina). Cada ciclo magnético induce un periodo de la onda temporal de f.e.m. al girar por delante de un conductor del rotor. Esto hace que en las fases del rotor se induzcan unas f.e.m.s cuya frecuencia es de n₂.p ciclos por minuto; es decir, una **frecuencia f₂** que medida en Hz (ciclos por segundo) vale:

$$f_2 = \frac{n_2 p}{60} = \frac{(s n_1) p}{60} = s \left(\frac{n_1 p}{60} \right)$$

Luego, teniendo en cuenta la relación (1) se deduce que:

$$f_2 = s \times f_1 \dots\dots\dots 4$$

El deslizamiento s de una máquina asíncrona en condiciones normales de funcionamiento es pequeño; esto significa que la frecuencia en el rotor f_2 es pequeña, muy inferior a la del estator f_1 .

Las f.e.m.s inducidas sobre las fases del rotor provocan la circulación de corrientes cuya frecuencia también es f_2 . Estas corrientes al circular por las fases del rotor originan, en virtud del Teorema de Ferraris, otro campo giratorio cuya velocidad relativa con respecto al rotor se calcula mediante una expresión similar a (1):

$$\frac{60 f_2}{p} = \frac{60(s f_1)}{p} = s \frac{60 f_1}{p} = s n_1 - n = n_2 \dots\dots\dots 5$$

Su velocidad absoluta se obtiene teniendo en cuenta que el rotor está girando con una velocidad n :

$$n_2 + n = (n_1 - n) + n = n_1 \dots\dots\dots 6$$

Luego, el **campo magnético del rotor gira a la misma velocidad de sincronismo que el del estator.**

Al final, se obtiene que el campo magnético total en el entrehierro, debido al efecto conjunto de las corrientes del estator y del rotor, gira a la velocidad de sincronismo n_1 .

El hecho de que los campos magnéticos del estator y rotor giren a la misma velocidad es importante, porque así la posición relativa de ambos campos no varía con el tiempo y la máquina produce, entonces, un par constante en el eje (sin pulsaciones en cada vuelta). Esta igualdad de velocidades es debida a que ambos devanados, el del estator y el del rotor, tienen el mismo número de polos. El que los dos devanados puedan tener diferente número de fases no influye para que generen campos giratorios de igual velocidad, como se puede apreciar observando las relaciones (1) y (5).

F.E.M.S. SEPARACIÓN DE RESISTENCIAS Y REACTANCIAS DE DISPERSIÓN

Se denomina Φ_M al **flujo por polo** debido al campo magnético común que existe en el entrehierro originado por la acción conjunta de los devanados del estator y del rotor. Este campo magnético gira a la velocidad de sincronismo n_1 . El giro de este campo produce sobre las fases del estator unas f.e.m.s de rotación cuyo valor eficaz se va a denominar E_1 y cuya frecuencia es igual a la de las corrientes del estator f_1 . Recordando lo estudiado anteriormente en el capítulo sobre los aspectos generales de las máquinas eléctricas, se tiene que esta f.e.m. verifica que:

$$E_1 = 4.44 \xi_{b1} \times f_1 \times N_1 \times \Phi_M \dots\dots\dots 7$$

Análogamente este campo magnético giratorio induce sobre el devanado del rotor unas f.e.m.s de rotación cuyo valor eficaz se va a denominar E_{2s} y cuya frecuencia es f_2 . Se tiene que:

$$E_{2s} = 4.44 \xi_{b2} \times f_2 \times N_2 \times \Phi_M \dots\dots\dots 8$$

En el caso de que el rotor estuviera parado, de acuerdo con las expresiones (2) y (4) se tiene que:

$$n = 0 \quad \Rightarrow s = 1 \quad \Rightarrow f_2 = f_1 \dots\dots\dots 9$$

Sea E_2 el valor eficaz de las f.e.m.s inducidas sobre las fases del rotor cuando se encuentra parado. Se cumplirá que:

$$E_2 = 4.44 \xi_{b2} \times f_1 \times N_2 \times \Phi_M \dots\dots\dots 10$$

Comparando las expresiones (8) y (10) y teniendo en cuenta la relación (4) se deduce que:

$$E_{2s} = sE_2 \dots\dots\dots 11$$

Se denomina **relación de transformación de tensiones m_v** a este cociente:

$$m_v = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\xi_{b1} \times N_1}{\xi_{b2} \times N_2} \dots\dots\dots 12$$

Además del campo común existe el campo magnético de dispersión o de fugas, que da lugar a sendos enlaces de flujo de dispersión en las fases del estator y del rotor. Las líneas de campo de dispersión incluyen en su recorrido largos tramos de aire; por lo que, al igual que se hizo con los transformadores, se puede considerar que sus efectos se pueden analizar utilizando para cada fase unas autoinductancias constantes, L_{d1} en el estator y L_{d2} en el rotor. Las reactancias debidas a estas autoinductancias son:

- En el estator: $X_1 = 2\pi \times f_1 \times L_{d1}$
- En el rotor: $X_{2s} = 2\pi \times f_2 \times L_{d2}$
- En el rotor parado: $X_1 = 2\pi \times f_1 \times L_{d2}$

Luego, de acuerdo con (4) se deduce que:

$$X_{2s} = sX_2 \dots\dots\dots 13$$

Además, denominaremos R_1 a la resistencia de una fase del estator y R_2 a la resistencia de una fase del rotor.

De todo lo anterior y trabajando con los mismos convenios de signos utilizados anteriormente para los transformadores se puede obtener el esquema por fase de un motor asíncrono, el cual está representado en la Fig. 9.

En este esquema, al adoptar el mismo convenio de signos que en los transformadores, se está presuponiendo que el flujo de potencia se dirige desde el estator hacia el rotor; es decir, que la máquina está actuando como **motor**. Esta es la forma de funcionamiento más frecuente en las máquinas de inducción y, por esta razón, a partir de ahora en los siguientes apartados, salvo indicación contraria, se va a seguir suponiendo que la máquina actúa como motor.

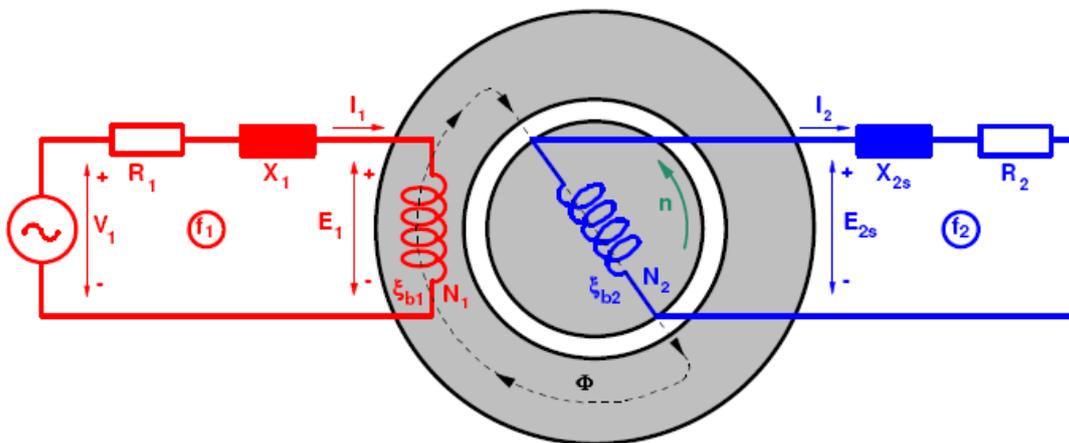


Fig. 9: Esquema por fase de un motor asíncrono polifásico

Recuérdese que en el esquema de la Fig. 9 las magnitudes del rotor f_2 , E_{2s} y X_{2s} son funciones del deslizamiento s y, en consecuencia, varían con la velocidad de giro n de la máquina. En el caso de que el motor esté parado, estas magnitudes pasan a ser f_1 , E_2 y X_2 , respectivamente.

CIRCUITO EQUIVALENTE

Con objeto de facilitar el análisis de un motor asíncrono, siguiendo un procedimiento similar al utilizado para los transformadores, se sustituye su rotor por otro equivalente de forma que el resto de la máquina no se vea afectado por este cambio. Esto significa que al sustituir el rotor real por el equivalente las magnitudes del estator, el flujo de potencia a través del entrehierro y el campo magnético no cambiarán y, por lo tanto, el flujo por polo Φ_M seguirá conservando el mismo valor. Además, el rotor equivalente se elige de forma que su devanado sea idéntico al del estator; es decir, con el mismo número de fases m_1 , número de espiras N_1 y factor de bobinado x_{b1} que el estator, e **inmóvil** para que sus corrientes tengan la misma frecuencia f_1 que las del

estator. Este rotor equivalente se denomina **rotor reducido al estator**. Así pues, se tiene que:

$$m'_2 = m_1; \quad N'_2 = N_1; \quad \xi'_{b2} = \xi_{b1}; \quad f'_2 = f_1$$

Como el devanado del rotor reducido al estator está inmóvil (al igual que el estator), es idéntico al estator y el flujo por polo es igual al que actúa sobre el estator, se deduce que la f.e.m. inducida sobre una fase es la misma que en el estator. Teniendo en cuenta la relación (12) se llega a:

$$\bar{E}'_2 = \bar{E}_1 = m_v \bar{E}_2 \dots\dots\dots 14$$

Según el Teorema de Ferraris, estudiado en el capítulo de los aspectos generales de las máquinas eléctricas, el rotor real da lugar a una f.m.m. cuyo valor máximo es $m_2/2$ veces el originado por una sola de sus fases. Luego

$$\mathcal{F}_{2M} = \frac{m_2}{2} \left(0,9 \xi_{b2} \frac{N_2 I_2}{p} \right)$$

El rotor reducido al estator debe generar la misma f.m.m., luego se debe cumplir que:

$$\mathcal{F}'_{2M} = \mathcal{F}_{2M} = \frac{m'_2}{2} \left(0,9 \xi'_{b2} \frac{N'_2 I'_2}{p} \right) = \frac{m_1}{2} \left(0,9 \xi_{b1} \frac{N_1 I_2}{p} \right)$$

Identificando las dos expresiones anteriores se obtiene que:

$$\frac{m_1}{2} \left(0,9 \xi_{b1} \frac{N_1 \times I'_2}{p} \right) = \frac{m_2}{2} \left(0,9 \xi_{b2} \frac{N_2 I_2}{p} \right)$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{\frac{m_1 N_1 \xi_{b1}}{m_2 N_2 \xi_{b2}}}$$

De lo que se deduce que:

$$I'_2 = \frac{\bar{I}_2}{m_i} \dots\dots\dots 15$$

La **relación de transformación de corrientes m_i** es este cociente:

$$m_i = \frac{m_1 N_1 \xi_{b1}}{m_2 N_2 \xi_{b2}} \dots\dots\dots 16$$

Comparando las relaciones (12) y (16) se comprueba que:

$$m_i = \frac{m_1}{m_2} m_v \dots\dots\dots 17$$

En los rotores bobinados lo normal es que su número de fases m_2 iguale al del estator m_1 . En este caso, según (17), las relaciones transformación de tensiones m_v y de corrientes m_i son iguales. En los rotores de jaula de ardilla los números de fases m_1 y m_2 suelen ser distintos y, en consecuencia, las relaciones m_v y m_i también son diferentes.

Se demuestra que la resistencia R'_2 y reactancia X'_2 del rotor reducido al estator se obtienen así:

$$R'_2 = m_v m_i R_2 ; \quad X'_2 = m_v m_i X_2 \dots\dots\dots 18$$

De todo lo anterior, se puede concluir que un motor de inducción se comporta de una forma muy similar a un transformador que tuviera diferentes relaciones de transformación para las tensiones y para las corrientes.

Trabajando de forma análoga a la seguida con los transformadores se deduce que un motor asíncrono con el rotor reducido al estator verifica estas ecuaciones:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}'_2 \dots\dots\dots 19a$$

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_{Fe} + \bar{I}_\mu \dots\dots\dots 19b$$

$$\bar{V}_1 = \bar{E}_1 + \bar{I}_1 (R_1 + jX_1) \dots\dots\dots 19c$$

$$\bar{E}'_2 = \bar{E}_1 = \bar{I}'_2 (R'_2 + jX'_2) + \bar{I}'_2 R'_c \dots\dots\dots 19d$$

Se puede encontrar un circuito que cumpla también estas ecuaciones, el cual está representado en la Fig. 10. Por lo tanto, este circuito es equivalente al motor y se pueden calcular magnitudes del motor resolviendo este circuito.

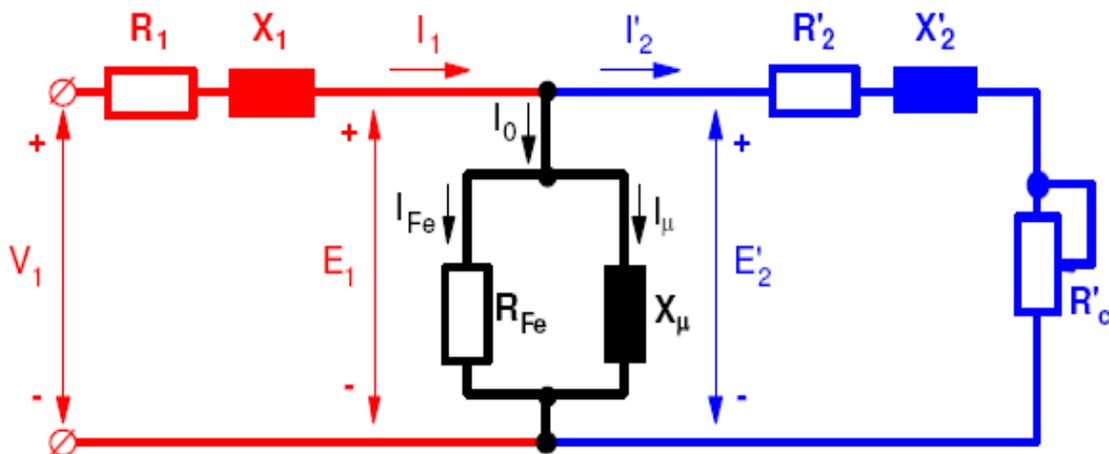


Fig. 10: Circuito equivalente exacto de un motor asíncrono polifásico

En las ecuaciones (19) y en el circuito equivalente de la Fig. 10 aparece la **resistencia de carga reducida al estator \$R'_c\$** cuyo valor es:

$$R'_c = R'_2 \times \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \dots\dots\dots 20$$

De forma que se cumple también la siguiente relación:

$$R'_2 + R'_c = \frac{R'_2}{s} \dots\dots\dots 21$$

Esta resistencia de carga aparece porque al utilizar un rotor equivalente que está inmóvil desaparece la potencia que el rotor real proporciona en forma de potencia mecánica giratoria en el eje del motor. Como el rotor reducido al estator debe dar lugar al mismo flujo de potencia a través del entrehierro y en él no hay potencia mecánica (por estar inmóvil), se introduce la resistencia de carga para que la potencia gastada en ella iguale a la potencia mecánica que suministra el rotor real. Es decir, calculando la potencia gastada en esta resistencia de carga ($m'_2 R'_c I_2'^2 = m_1 R'_c I_2'^2$) se obtiene la potencia mecánica que se produce en el rotor real.

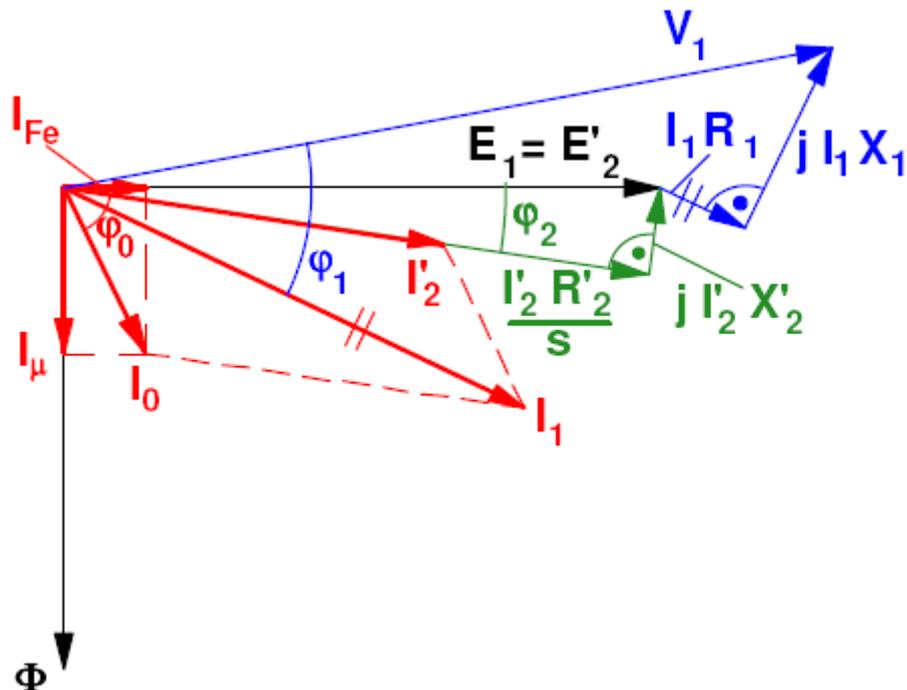


Fig. 11: Diagrama fasorial de un motor asíncrono polifásico

Las ecuaciones (19) se pueden representar mediante el **diagrama fasorial de un motor asíncrono polifásico** de la Fig. 11.

Al igual que se hizo con los transformadores se pueden simplificar los cálculos si se utiliza el circuito equivalente aproximado de la Fig. 12. Los parámetros de este circuito equivalente se pueden obtener experimentalmente mediante los **ensayos de vacío y de cortocircuito**.

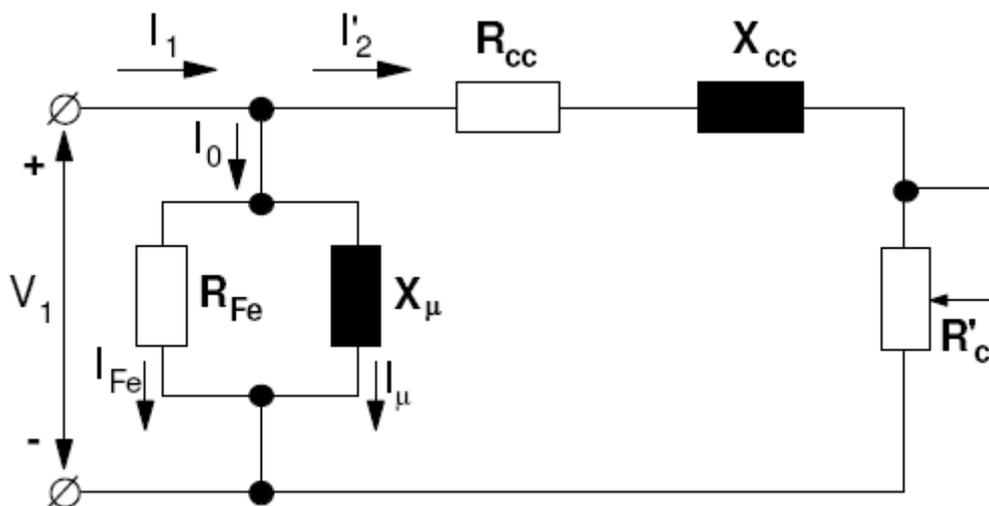


Fig. 12: Circuito equivalente aproximado de un motor asíncrono polifásico

La resistencia y reactancia de cortocircuito, R_{cc} y X_{cc} , que aparecen en la Fig. 12 son:

$$R_{cc} = R_1 + R'_2 ; \quad X_{cc} = X_1 + X'_2 \quad \dots\dots\dots 22$$

Teniendo en cuenta la relación (21) se llega a

$$R'_{cc} + R'_c = R_1 + \frac{R'_2}{s} \quad \dots\dots\dots 23$$

En un motor asíncrono la **marcha en vacío** es una **marcha industrial** en la que la potencia útil es nula. Por lo tanto, es una marcha en la que el estator del motor se alimenta a la tensión y frecuencia asignadas (marcha industrial) y no se conecta ninguna carga mecánica al eje de la máquina (potencia útil nula). En esta situación el par que proporciona la máquina prácticamente es nulo (sólo debe vencer los rozamientos mecánicos de la máquina) y su velocidad no se diferencia apenas de la síncrona, por lo que las f.e.m.s inducidas en el rotor son muy pequeñas y las corrientes en las fases del rotor son totalmente despreciables frente a las del estator. Resumiendo, las corrientes que circulan por el motor durante la marcha de vacío son:

Marcha en vacío:

$$I_1 = I_0 ; \quad I_2 \approx 0$$

La corriente de vacío I_0 de un motor asíncrono no es tan pequeña como la de un transformador (para motores de potencia superior a 10 Kw. la corriente de vacío I_0 toma valores del 20 al 50% de la corriente asignada I_{1N}), porque el circuito magnético de un motor tiene mayor reluctancia debido a la existencia de entrehierro. Esto hace que el error cometido al utilizar el circuito equivalente aproximado de la Fig. 12 en lugar del circuito equivalente exacto de la Fig. 10 sea apreciablemente mayor. Sin embargo, esta aproximación da resultados suficientemente exactos en motores de más de 10 Kw. y, por esta razón, en este texto se utilizará básicamente el circuito equivalente aproximado de la Fig. 12.

BALANCE DE POTENCIAS

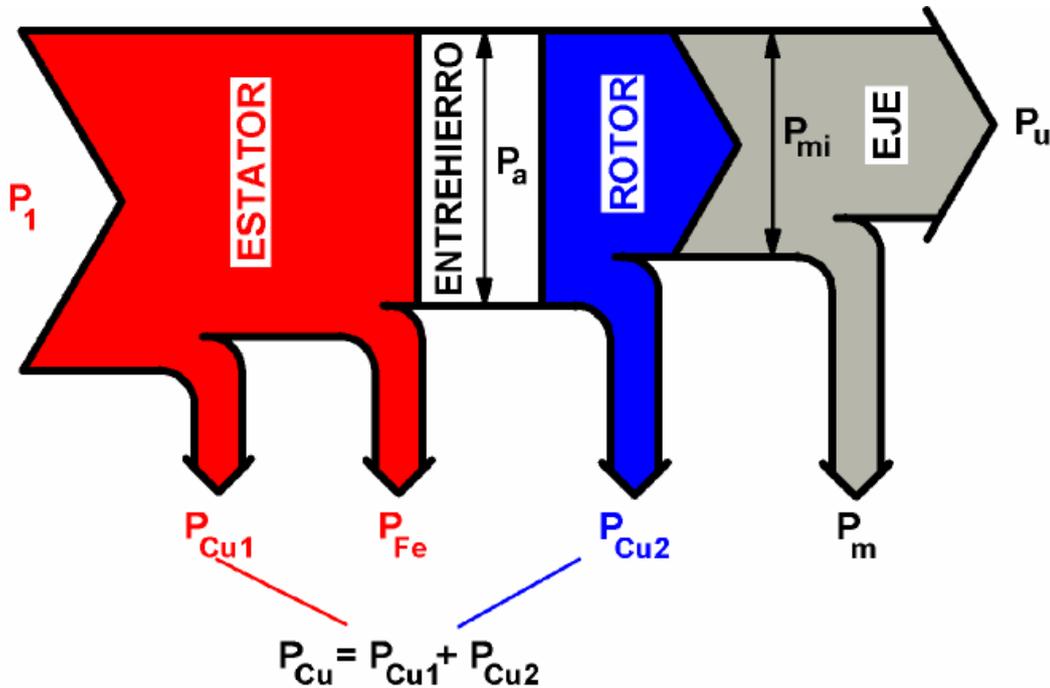


Fig. 13: Balance de potencias de un motor asíncrono

En este apartado se va a estudiar el balance de potencias de una máquina asíncrona polifásica actuando como motor. En consecuencia, en lo que sigue se adopta el criterio de signos de considerar positivas las potencias cuyo sentido sea el correspondiente al funcionamiento de la máquina como motor. Se supondrá que la máquina funciona con una marcha industrial (por lo tanto, el valor eficaz y la frecuencia de las tensiones de las fases del estator son constantes e iguales a sus valores asignados) y con un deslizamiento s pequeño. En este análisis se va a utilizar el circuito equivalente exacto de la Fig. 10.

En un motor la potencia fluye desde el estator hacia el rotor y el eje de la máquina (ver la Fig. 13), transformándose la energía eléctrica absorbida en el estator P_1 en potencia mecánica útil P_u en el eje.

La **potencia activa absorbida por el estator P_1** en función de los valores de fase de la tensión V_1 y de la corriente I_1 estatóricas, así como del factor de potencia $\cos \phi_1$ y del número de fases m_1 del estator es así:

$$P_1 = m_1 V_1 I_1 \cos \phi_1 \dots\dots\dots 24$$

Una vez en el estator, parte de esta potencia se pierde en forma de calor por efecto Joule en la resistencia R_1 de las fases del estator dando lugar a las **pérdidas en el cobre del estator P_{Cu1}**

$$P_{cul} = m_1 R_1 I_1^2 \dots\dots\dots 25$$

En el estator existen otras pérdidas que se producen en su circuito magnético. Estas pérdidas son debidas a los fenómenos de la histéresis y de las corrientes de Foucault y se denominan pérdidas magnéticas o **pérdidas en el hierro P_{Fe}**

$$P_{Fe} = m_1 E_1 I_{Fe} \approx m_1 V_1 I_{Fe} \dots\dots\dots 26$$

En principio también existen pérdidas en el hierro en el rotor. Pero, como se estudió en una lección anterior, las pérdidas magnéticas dependen aproximadamente del cuadrado de la frecuencia. Como la frecuencia f_2 de las corrientes del rotor es mucho más pequeña que la frecuencia f_1 del estator en condiciones normales de funcionamiento (deslizamientos s pequeños), sucede que las pérdidas en el hierro del rotor son despreciables frente a las del estator. En consecuencia, en este texto se aceptará que la totalidad de las pérdidas en el hierro se producen en el estator.

Después de haberse producido las pérdidas en el cobre del estator y las pérdidas en el hierro, la potencia restante se transfiere del estator hacia el rotor a través del entrehierro. Esta potencia se la denomina **potencia en el entrehierro P_a** (Fig. 13):

$$P_a = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe} \dots\dots\dots 27$$

De la potencia **P_a** que llega al rotor parte se pierde por efecto Joule en la resistencia R_2 de las fases del rotor dando lugar a las **pérdidas en el cobre del rotor P_{Cu2}**

$$P_{Cu2} = m_2 R_2 I_2^2 = m_1 R'_2 I_2^2 \dots\dots\dots 28$$

La potencia restante es la potencia que se convierte de potencia electromagnética en potencia mecánica. Cuando esta potencia se ha convertido en mecánica se la denomina **potencia mecánica interna P_{mi}** y es la potencia que llega al eje de la máquina. Como ya se indicó anteriormente, esta es la potencia que en el circuito equivalente se consume en la resistencia de carga R'_c . Luego, teniendo en cuenta también la relación (20) se llega a:

$$P_{mi} = m_1 R'_c I_2^2 = M_1 R'_2 \left(\frac{1}{S} - 1\right) I_2^2 = m_1 R'_2 \left(\frac{1-S}{S}\right) I_2^2 \dots\dots\dots 29$$

Una pequeña parte de la potencia se pierde por rozamientos y ventilación; es decir, por las **pérdidas mecánicas P_m**. El resto es la **potencia útil P_u** del motor:

$$P_u = P_{mi} - P_m \dots\dots\dots 30$$

Muchas veces se desprecian las pérdidas mecánicas y se considera que la potencia mecánica interna P_{mi} es igual a la potencia útil P_u .

Teniendo en cuenta la Fig. 12 y las relaciones (21), (28) y (29) se llega a

$$P_a = P_{mi} + P_{Cu2} = m_1(R'_c + R'_2)I_2'^2 = m_1 \frac{R'_2}{S} I_2'^2 \dots\dots\dots 31$$

De las relaciones (28), (29) y (31) se obtienen estas otras

$$P_{Cu2} = \frac{S}{1-S} P_{mi} = sP_a \dots\dots\dots 32$$

$$P_a = \frac{P_{Cu2}}{S} = \frac{P_{mi}}{1-S} \dots\dots\dots 33$$

Las relaciones obtenidas en este apartado se pueden recordar fácilmente a partir de la Fig. 13 y si se tiene en cuenta que en el circuito equivalente exacto de la Fig. 10:

- P_1 es la potencia total consumida en el circuito equivalente
- P_{Cu1} es la potencia perdida en la resistencia R_1
- P_{Fe} es la potencia disipada en la resistencia R_{Fe}
- P_a es la potencia gastada en la totalidad de las resistencias del rotor, es decir, en $R'_2 + R'_c = R'_2/s$
- P_{Cu2} es la potencia disipada en la resistencia R'_2
- P_{mi} es la potencia consumida en la resistencia R'_c

El rendimiento de un motor asincrónico es igual a este cociente

$$\eta = \frac{P_u}{P_1} = \frac{P_u}{P_u + P_f + P_v} \dots\dots\dots 34$$

Funcionando a marcha industrial y con deslizamientos pequeños (por lo tanto, a velocidad casi constante), se tiene que:

$$\text{Pérdidas fijas: } P_f = P_{Fe} + P_m \dots\dots\dots 35a$$

$$\text{Pérdidas variables: } P_v = P_{Cu} \dots\dots\dots 35b$$

Donde las **pérdidas en el cobre P_{Cu}** son: $P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2} \dots\dots\dots 36$

Por lo tanto, el cociente (34) se puede poner así

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_m + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_{Cu1}} \dots\dots\dots 37$$

PAR DE ROTACIÓN

Teniendo en cuenta que la constante $2\pi/60$ es el factor de conversión de r.p.m. a rad/s, el **par útil M_u** de un motor asíncrono se puede obtener así:

$$M_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{P_u}{\frac{2\pi}{60}n} \dots\dots\dots 38$$

El **par interno M** se obtiene de la potencia mecánica interna

$$M = \frac{P_{mi}}{\Omega} = \frac{P_{mi}}{\frac{2\pi}{60}n} \dots\dots\dots 39a$$

Teniendo en cuenta las relaciones (2) y (33) se deduce que (39a) se puede convertir en

$$M = \frac{P_a}{\Omega_1} = \frac{P_a}{\frac{2\pi}{60}n_1} \dots\dots\dots 39b$$

Si se desprecian las pérdidas mecánicas se tiene que:

$$P_m \approx 0 \rightarrow P_u \approx P_{mi} \rightarrow M_u \approx M \dots\dots\dots 40$$

Por lo tanto, en lo que sigue se va a analizar el par interno M que se supondrá prácticamente igual al par útil M_u .

Del circuito equivalente aproximado de la Fig. 12 y de la relación (23) se obtiene que

$$I'_2 = \frac{V_1}{\sqrt{(R_{cc} + R'_c)^2 + X_{cc}^2}} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{cc}^2}} \dots\dots\dots 41$$

El denominador de la relación (41) es el módulo de la impedancia de la rama en serie del circuito equivalente aproximado (Fig. 12).

Combinando las expresiones (2), (29), (39) y (41) se obtiene la siguiente expresión del par de un motor asíncrono polifásico

$$M = \frac{m_1 \frac{R'_2}{s}}{\frac{2\pi}{60} n_1} = \frac{V_1^2}{\left(\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{cc}^2 \right)} \dots\dots\dots 42$$

Esta expresión indica que, cuando la máquina funciona a tensión y frecuencia en el estator constantes, el par sólo varía en función del deslizamiento s ; es decir, el par varía solamente con la velocidad de giro del rotor.

En la Fig. 14 se representa la curva par-velocidad de una máquina asíncrona funcionando a tensión y frecuencia estatóricas constantes. En el eje de abscisas se ha colocado una doble escala: por un lado se indica la velocidad y por el otro el deslizamiento correspondiente.

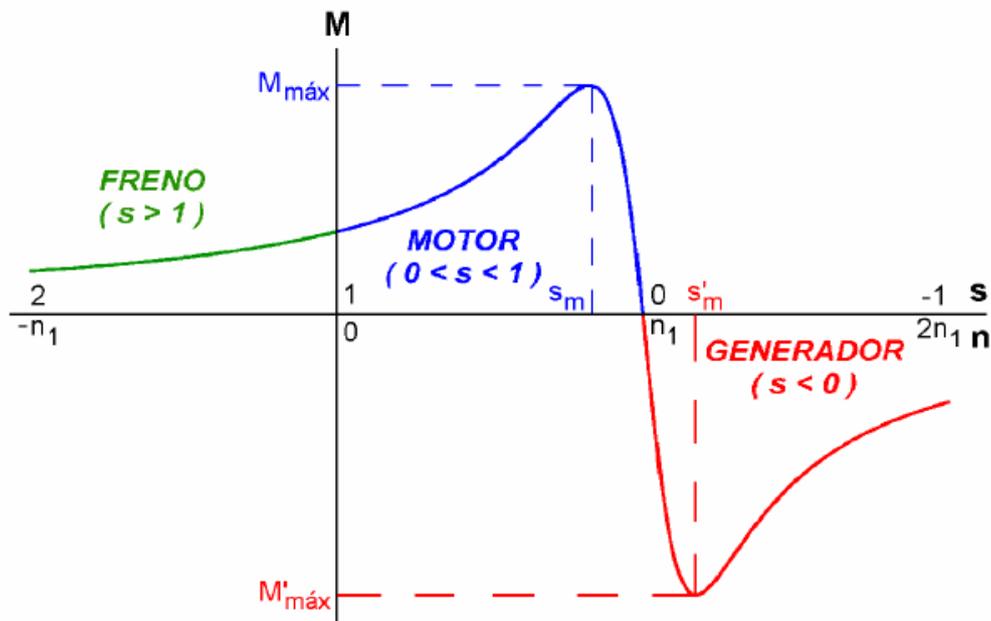


Fig. 14: Curva par-velocidad de una máquina asíncrona polifásica a V_1 y f_1 constantes

En esta curva se pueden distinguir tres modos de funcionamiento:

Motor

En este régimen de funcionamiento la velocidad n del motor varía entre 0 y la de sincronismo n_1 , lo que quiere decir que el deslizamiento s varía entre 1 y 0.

Por lo tanto, funcionando como motor la velocidad de la máquina es del mismo sentido que la de sincronismo y de **menor** valor que ésta.

Al realizar el balance de potencias se adoptó el criterio de signos de suponer que las potencias son positivas cuando la máquina actúa como motor; luego en estas condiciones tanto P_a como P_{mi} son positivos. Por lo tanto, en un motor asíncrono la máquina absorbe potencia eléctrica por el estator para convertirla en potencia mecánica en su eje.

En este caso tanto el par como la velocidad tienen signo positivo. Por lo tanto, el par está a favor de la velocidad y se trata de un par motor. Es este par el que provoca el giro de la máquina.

Generador

En este régimen de funcionamiento la velocidad n del motor es superior a la de sincronismo n_1 , lo que quiere decir que el deslizamiento s es negativo. Por lo tanto, funcionando como generador la velocidad de la máquina es del mismo sentido que la de sincronismo y de **mayor** valor que ésta.

Al ser el deslizamiento s negativo se obtiene que tanto R'_c como $R'_c + R'_2 = R'_2/s$ son negativos. Esto da lugar a que la potencia mecánica interna P_{mi} y la potencia en el entrehierro P_a sean negativas; lo cual significa que el sentido de estas potencias es el opuesto al del funcionamiento como motor. En consecuencia, en un generador de inducción la máquina absorbe potencia mecánica en su eje para convertirla en potencia eléctrica (potencia activa) que se suministra a la red conectada al estator.

En este caso el par es negativo y la velocidad es positiva. Por lo tanto, el par de la máquina de inducción se opone a la velocidad y se trata de un par de frenado. Deberá existir otro par, por ejemplo el producido por un motor de gasolina acoplado al mismo eje que la máquina asíncrona, que mueva al grupo y que lo esté haciendo girar a una velocidad mayor que la de sincronismo.

Freno a contracorriente

En este régimen de funcionamiento la velocidad n del motor es negativa, de sentido contrario a la de sincronismo n_1 , lo que quiere decir que el deslizamiento s es mayor que 1.

Al ser el deslizamiento s mayor que 1 se obtiene que R'_c es negativo; sin embargo la resistencia $R'_c + R'_2 = R'_2/s$ es positiva. Esto da lugar a que la potencia mecánica interna P_{mi} sea negativa y que la potencia en el entrehierro P_a sea positiva. Por lo tanto, en el entrehierro el flujo de potencia es igual que en un motor (P_a es positiva), del estator hacia el rotor; pero, la potencia mecánica interna P_{mi} es de signo contrario a la de funcionamiento como motor (P_{mi} negativa), entra por el eje y se dirige hacia el rotor. En consecuencia,

funcionando como freno a contracorriente una máquina asíncrona absorbe potencia eléctrica por el estator y potencia mecánica por su eje. La totalidad de la suma de estas dos potencias absorbidas se disipa en forma de calor entre todas las pérdidas de la máquina, la cual se puede llegar a calentar excesivamente.

En este caso el par es positivo y la velocidad negativa. Por lo tanto, el par de la máquina de inducción se opone a la velocidad y se trata de un par de frenado que se opone a su movimiento.

Los valores máximos de la curva par-velocidad de la Fig. 14 se obtienen igualando a cero la derivada de la expresión (42) con respecto al deslizamiento s . Se obtiene que los pares máximos se producen para estos valores de deslizamiento

$$s_m = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2}} \dots\dots\dots 43$$

El valor positivo de la fórmula (43) corresponde a la máquina actuando como motor (s_m en la Fig. 14), mientras que el valor negativo corresponde a funcionamiento como generador (s'_m en la Fig. 14).

Sustituyendo (43) en (42) se obtiene que la máquina tiene dos pares máximos, uno cuando actúa como motor y otro cuando funciona como generador:

$$M = \pm \frac{m_1}{\frac{2\pi}{60} n_1} = \frac{V_1^2}{2(\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2})} \dots\dots\dots 44$$

En la relación anterior el signo + corresponde al par máximo en el funcionamiento como motor ($M_{m\acute{a}x}$ en la Fig. 14) y el signo - al par máximo en el funcionamiento como generador ($M'_{m\acute{a}x}$ en la Fig. 14). Se puede apreciar que estos dos pares tienen valores absolutos ligeramente diferentes, siendo mayor el correspondiente al funcionamiento como generador (porque entonces el denominador de (44) es menor).

CURVA PAR-VELOCIDAD DE UN MOTOR ASÍNCRONO POLIFÁSICO

Puntos notables

En la Fig. 15 se muestra la zona de la curva par-velocidad de una máquina de inducción (Fig. 14) correspondiente al funcionamiento como motor.

En esta curva se aprecia que el punto de par nulo se produce a la velocidad de sincronismo (deslizamiento nulo). Esto es así porque esta curva se refiere al par interno. El par útil nulo se produce para una velocidad ligeramente inferior a la de sincronismo porque entonces el par interno no es exactamente nulo, sino muy pequeño pues debe vencer el par debido a rozamientos y ventilación.

En el momento de arrancar un motor su velocidad todavía es nula y su deslizamiento es, pues, igual a 1. Por lo tanto, en la Fig. 15 el punto de corte de la curva con el eje de ordenadas corresponde al **par de arranque M_a** . Este par se puede calcular mediante la expresión general del par (42) dándole al deslizamiento s el valor 1.

En la Fig. 15 se han representado también los puntos correspondientes al **par máximo $M_{máx}$** y al **par asignado M_N** . El par máximo viene dado por la relación (44) y se produce para el deslizamiento s_m dado por (43). s_m suele tomar valores entre el 15% y el 30%. El par asignado se puede calcular mediante (42) dando al deslizamiento el valor s_N de la marcha asignada. s_N suele tomar valores entre el 3% y el 8%.

Se denomina **capacidad de sobrecarga** a este cociente

$$\text{Capacidad de sobrecarga} = \frac{M_{máx}}{M_N} \dots\dots\dots 45$$

Cuyo valor en motores normales varía entre 1,8 y 2,7. En motores especiales alcanza valores superiores a 3.

El cociente M_a/M_N toma valores entre 1,2 y 2.

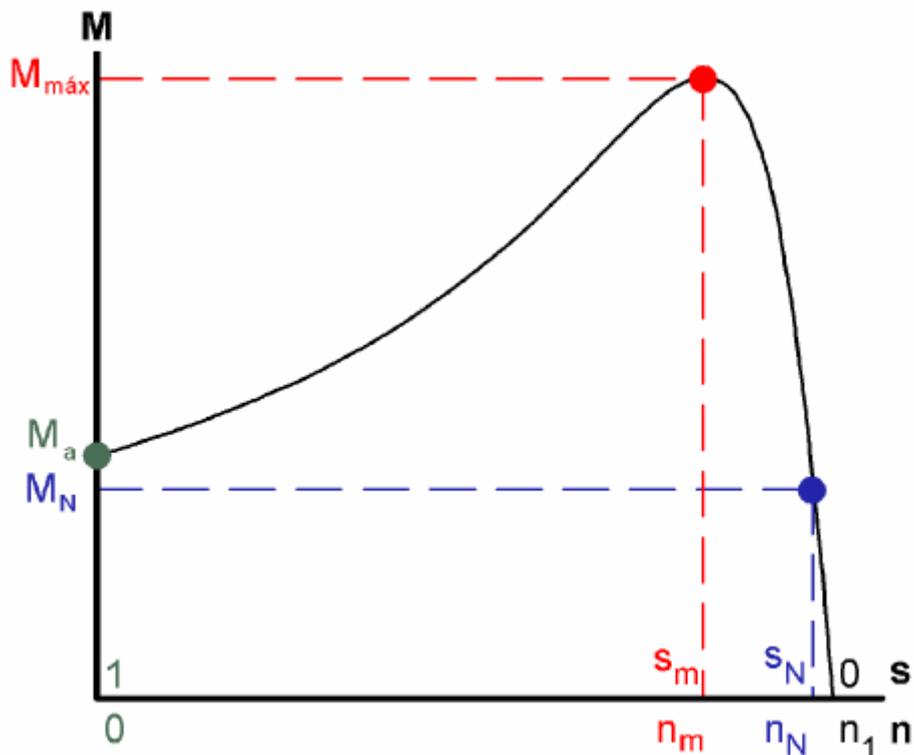


Fig. 15: Curva par-velocidad de un motor asíncrono polifásico a V_1 y f_1 constantes

Punto de funcionamiento. Estabilidad

Cuando un motor asíncrono mueve una carga mecánica en régimen permanente se establece un equilibrio de pares entre el par motor M proporcionado por la máquina asíncrona y el par resistente M_r de la carga. Por lo tanto, el sistema motor-carga funciona en un punto en el que se verifica la siguiente igualdad:

Punto de funcionamiento: $M = M_r$ 46

En la Fig. 16 se ha representado sobre los mismos ejes de coordenadas las curvas par-velocidad del motor y de la carga. El punto de funcionamiento del sistema (P en la Fig. 16) será el punto de corte de ambas curvas.

En algunos casos las curvas de par del motor y de la carga se cortan en dos puntos situados uno a la derecha del punto de par máximo y el otro a la izquierda. En la Fig. 17 está representada esta situación.

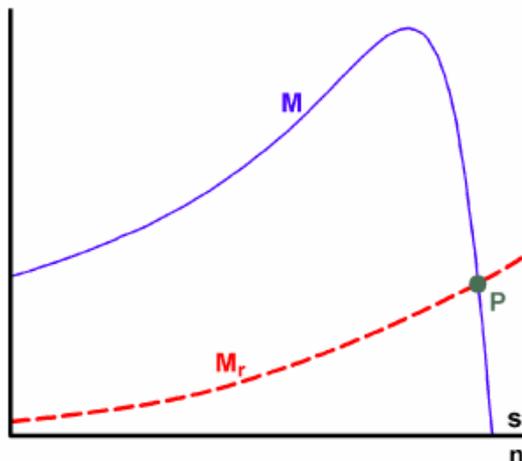


Fig. 16: Punto de funcionamiento

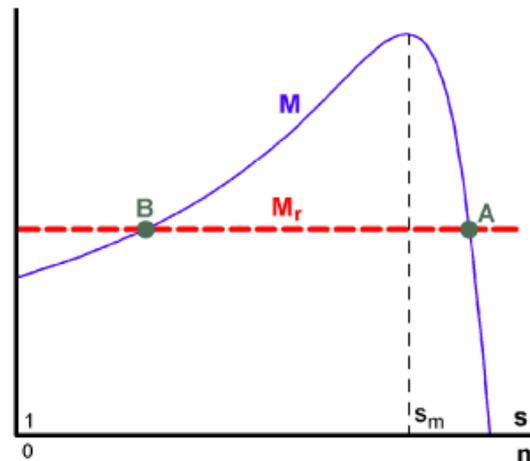


Fig. 17: Estabilidad

Se demuestra que el punto con un deslizamiento superior al par máximo (B en la Fig. 17) está en una situación inestable, mientras que el que tiene un deslizamiento inferior a s_m (punto A en la Fig. 17) es estable. Por lo tanto, en el caso representado en la Fig. 17 el punto de funcionamiento del sistema será el A.

En general, salvo casos excepcionales, un motor asíncrono funciona en la zona de la curva par-velocidad con deslizamientos pequeños, inferiores a s_m . Realmente, lo normal es que no se sobrepase el par asignado con lo que se funciona con deslizamientos aún más pequeños, iguales o inferiores al deslizamiento asignado s_N .

La curva par-velocidad para deslizamientos pequeños es **dura** o **rígida**, lo que quiere decir que la velocidad varía muy poco con el par. Esta zona de la curva prácticamente es lineal variando el par M del motor proporcionalmente al deslizamiento s .

Efectos de variar V_1 y de introducir resistencias en serie con el rotor

A partir de las relaciones (42), (43) y (44) se aprecia que cuando se modifica el valor eficaz de la tensión del estator V_1 sin variar la frecuencia f_1 , el valor del deslizamiento de par máximo s_m no cambia pero el par de la máquina queda modificado en función del cuadrado de V_1 .

En la Fig. 18 se muestra como se modifica la curva par-velocidad de un motor cuando la tensión del estator se reduce de V_{1a} a V_{1b} . Para ambas tensiones el punto de par máximo se produce con el mismo deslizamiento s_m pero el par máximo varía con el cuadrado de la tensión.

El efecto de añadir en serie con cada fase del rotor una resistencia R_x es equivalente a considerar en las expresiones (42), (43) y (44) que la resistencia R_2 ha aumentado. Evidentemente, sólo es posible añadir resistencias en serie con el rotor en los motores de anillos, ya que en los de jaula de ardilla no es posible acceder al devanado del rotor para conectarle resistencias.

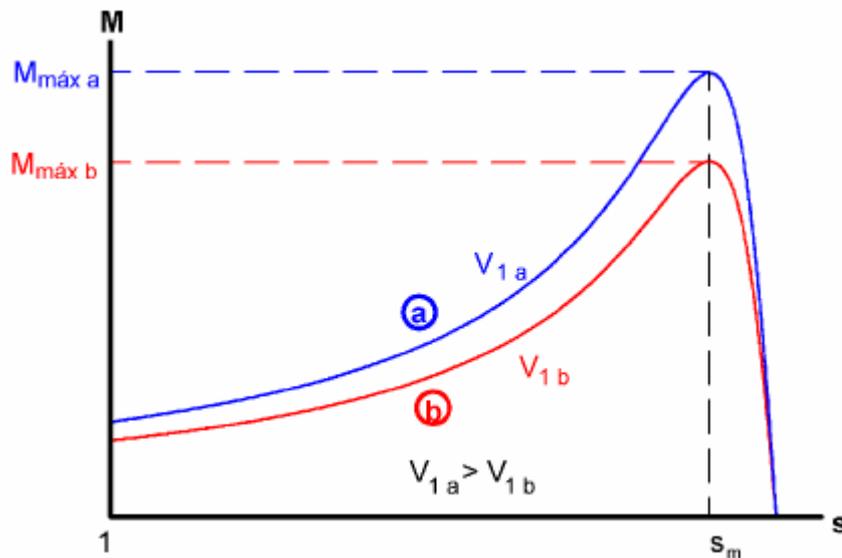


Fig. 18: Efectos de variar V_1

Teniendo en cuenta todo esto, la expresión (44) indica que el par máximo no se ve modificado por añadir resistencias en serie con el rotor, pues en esta relación no interviene el parámetro R'_2 . Por el contrario, la expresión (43) señala que el añadir resistencias en serie con el rotor; o lo que es equivalente, el aumentar la resistencia R'_2 , aumenta el deslizamiento de par máximo s_m .

En la Fig. 19 se muestra el efecto que sobre la curva par-velocidad tiene el introducir resistencias en serie con el rotor. La curva (a) corresponde al funcionamiento con el rotor en cortocircuito ($R_{xa} = 0$) y las curvas (b) y (c) corresponden al funcionamiento cuando se han introducido resistencias en serie con las fases del rotor ($R_{xc} > R_{xb}$). En esta figura se aprecia como el par máximo es el mismo en todas las curvas, pero el deslizamiento de par máximo va aumentando (luego la velocidad de par máximo va disminuyendo) a medida que aumenta el valor de las resistencias puestas en serie con las fases del rotor.

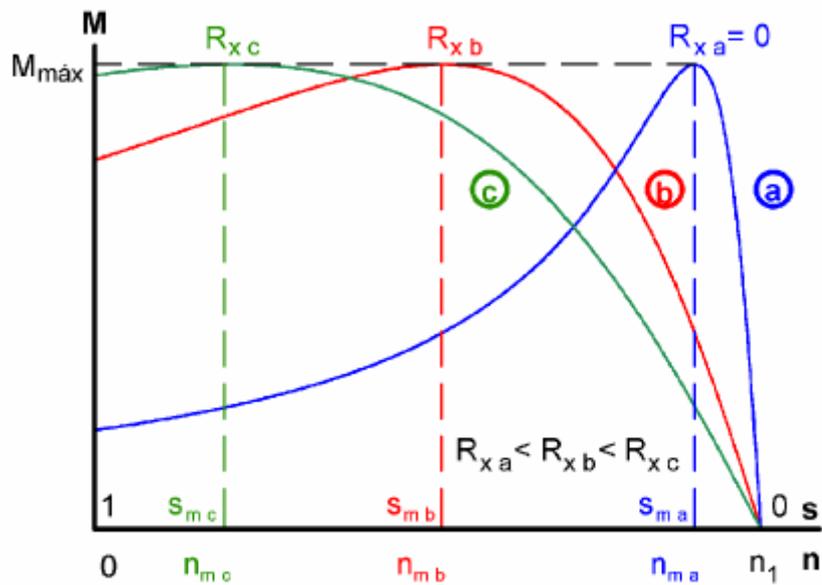


Fig. 19: Efectos de introducir resistencias en serie con las fases del rotor

La Fig. 20 muestra que existe un valor especial R_{adic} de las resistencias R_x puestas en serie con las fases del rotor que consigue que el par máximo se produzca en el arranque.

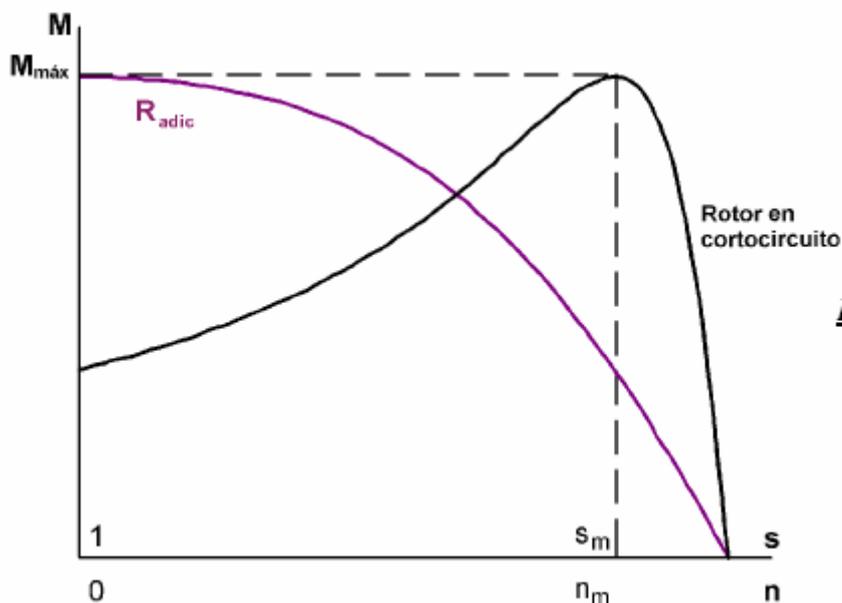


Fig. 20: Obtención del par máximo en el arranque mediante resistencias en serie con el rotor

Para calcular el valor de R_{adic} se tiene en cuenta que con ella el deslizamiento de par máximo s_m pasa a ser 1:

$$s_m = 1 = \frac{R'_2 + R'_{adic}}{\sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2}} \Rightarrow R'_{adic} = \sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2} - R'_2 \quad \dots\dots 47$$

Por analogía con las relaciones (18), el valor real de esta resistencia se obtiene de su valor reducido al estator así:

$$\Rightarrow R_{adic} = \frac{R'_{adic}}{m_v m_i} = \frac{\sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2} - R'_2}{m_v m_i} \quad \dots\dots\dots 48$$

ARRANQUE

El arranque es el proceso de puesta en marcha de un motor que lo lleva desde una velocidad nula a la del punto de funcionamiento estable que corresponda al par resistente de la carga que tiene que mover.

Para que pueda realizarse esta maniobra debe cumplirse la **condición de arranque**: a velocidad nula el par del motor debe ser superior al par resistente. De no cumplirse esta condición, el par motor es insuficiente para empezar a mover la carga mecánica que tiene acoplada y no se puede producir el arranque.

En el instante de iniciar el arranque, cuando la velocidad todavía es nula y el deslizamiento entonces vale 1, la corriente que demanda el motor es elevada, varias veces superior a la asignada. Esto se puede comprobar en el circuito equivalente aproximado de la Fig. 12 y en la ecuación (41) deducida de él, si se tiene presente que el deslizamiento en el arranque es igual a 1 mientras que marcha asignada es pequeño (no más de 0,08).

Esta corriente elevada puede provocar caídas de tensión en la instalación eléctrica a la que está conectado el motor afectando a otros aparatos conectados a ella. Por esta razón existen normas que establecen las máximas corrientes de arranque permitidas (en Baja Tensión estos límites vienen fijados en función de la potencia útil del motor en la instrucción ITC-BT-47 del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión).

Esto obliga a utilizar en muchas ocasiones procedimientos que reduzcan la corriente de arranque con respecto a la del arranque directo.

Arranque directo

Este método de arranque es el más sencillo y se emplea en motores de pequeña potencia (o en motores grandes si están conectados a una red eléctrica independiente de tal manera que su corriente de arranque no afecte a otros consumidores). Consiste en arrancar el motor conectándolo a su tensión asignada.

Como la corriente de arranque directo es varias veces superior a la asignada (entre 4 y 8 veces la intensidad asignada), en este caso sí que se puede desprestigiar la corriente de vacío y aceptar (por la ecuación (19a)) que la corriente del estator es igual a la del rotor reducido al estator. Esta corriente de arranque se puede obtener entonces de la relación (41) en la que se le da a la tensión de fase V_1 el valor asignado V_{1N} y al deslizamiento s el valor 1.

$$I_a = I'_{2a} = \frac{V_{1N}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{cc}^2}} = \frac{V_{1N}}{\sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}} \quad \dots\dots\dots 49$$

En un motor trifásico la corriente de línea de arranque directo I_{aL} se deduce de la de fase I_a teniendo en cuenta la forma de conexión de las fases del estator:

Estrella: $I_{aL} = I_a \quad \dots\dots\dots 50a$

Triángulo: $I_{aL} = 3 \times I_a \quad \dots\dots\dots 50b$

El par de arranque directo se le denomina M_a y se puede obtener mediante la ecuación (42) dando a la tensión de fase V_1 el valor asignado V_{1N} y al deslizamiento s el valor 1.

Arranques con tensión reducida

Existen varios procedimientos de arranque que consisten en alimentar al motor con una tensión inferior a la asignada en el momento del arranque para después, cuando el rotor ya está girando, ir la aumentando hasta alcanzar su valor asignado.

De esta manera, al tener en el arranque una tensión inferior a la asignada la corriente de arranque disminuye, pero también el par de arranque como se puede apreciar en las Figs. 18 y 21 (el par de arranque es proporcional al cuadrado de la tensión V_1). Esto hay que tenerlo en cuenta y comprobar que el par de arranque del motor a tensión reducida es suficientemente grande como para que se cumpla la condición de arranque. Por esta razón, estos procedimientos de arranque sólo se pueden utilizar si el motor se arranca sin carga o con cargas mecánicas que no ejerzan un par resistente elevado a bajas velocidades.

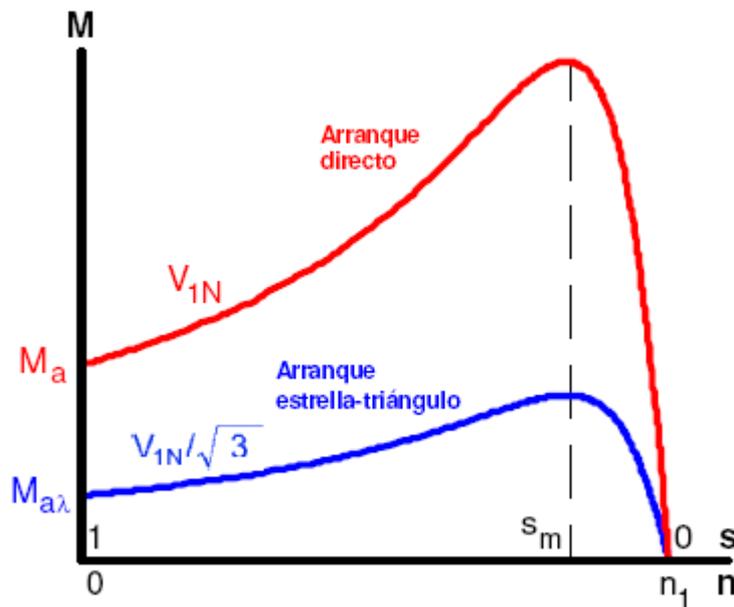


Fig. 21: Curvas par-velocidad a tensión asignada y a tensión reducida (arranque estrella-triángulo)

Para conseguir reducir la tensión durante el arranque se pueden emplear varios métodos: un autotransformador, un arrancador electrónico, conectar impedancias en serie con el estator. En los motores trifásicos uno de los más empleados es el **arranque estrella-triángulo**.

El arranque estrella-triángulo sólo se puede utilizar si el motor está conectado a una red eléctrica cuya tensión de línea sea igual a la tensión asignada de fase del motor. Esto obliga a que para que el motor funcione a su tensión asignada deba conectarse en triángulo:

$$V_{1L} = V_{1N} \Rightarrow \text{Conexión triángulo para que: } V_1 = V_{1N} \dots\dots\dots 51$$

En este caso el arranque se realiza con el motor conectado en estrella. Cuando el motor ha adquirido cierta velocidad se conmutan las conexiones y se lo conecta en triángulo para que pase a funcionar con su tensión asignada.

Al arrancar en estrella, la tensión de fase del motor ya no es la asignada sino $\sqrt{3}$ veces menor:

$$V_{1L} = V_{1N} \Rightarrow \text{Conexión estrella para que: } V_1 = \frac{V_{1L}}{\sqrt{3}} = \frac{V_{1N}}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots 52$$

Esto provoca que la corriente de **fase** en este arranque sea $\sqrt{3}$ veces menor que en el arranque directo. En consecuencia, tanto la corriente de **línea** en el arranque estrella-triángulo $I_{a\lambda}$ como el par de arranque correspondiente $M_{a\lambda}$

son iguales a la tercera parte de sus respectivos valores en el arranque directo (ver la Fig. 21):

$$I_{a\lambda} = \frac{I_{aL}}{3} \quad ; \quad M_{a\lambda} = \frac{M_a}{3} \quad \dots\dots\dots 53$$

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 estas resistencias hasta que el rotor queda cortocircuitado.

Con este sistema se reduce la intensidad de arranque (se aumenta el denominador en la relación (41)) y se aumenta el deslizamiento en el que se produce el par máximo, pero sin que éste varíe (Figs. 19 y 20); lo que origina el aumento del par de arranque con respecto al del arranque directo. Incluso se puede obtener el par máximo en el arranque para la resistencia R_{adic} conectada en serie con el rotor, cuyo valor viene dado por la expresión (48).

MOTORES DE DOBLE JAULA Y DE RANURA PROFUNDA

El sistema de arranque por introducción de resistencias en serie con el rotor es el más adecuado de los analizados en el apartado anterior, ya que permite obtener un elevado par en el arranque a la vez que reduce la corriente de arranque. Sin embargo, este método sólo puede utilizarse con motores de rotor bobinado.

Se han construido motores de jaula que, de alguna manera, realizan un arranque similar al de los motores de rotor bobinado, es decir, con un elevado par de arranque.

Los **motores de doble jaula** poseen dos jaulas concéntricas (Fig. 22a) construidas de tal manera que la jaula exterior presenta una pequeña autoinducción (debida a los flujos de dispersión) y una elevada resistencia, mientras que la interior presenta baja resistencia y alta autoinducción.

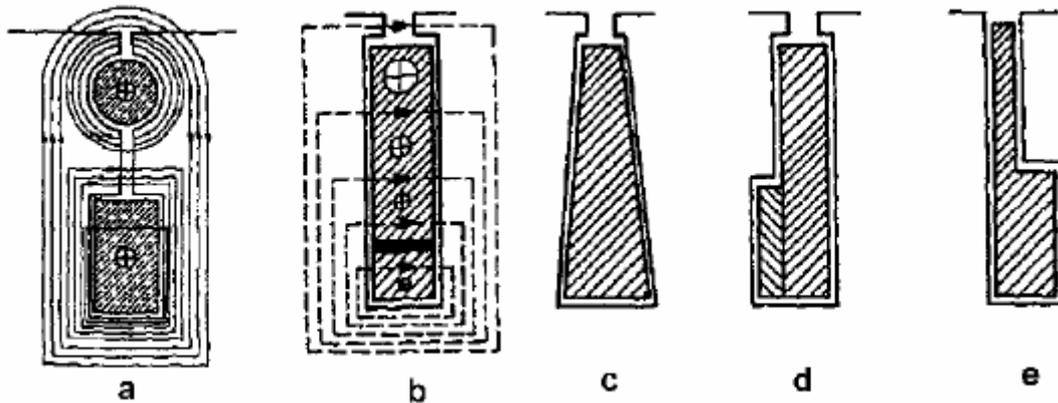


Fig. 22: Ranuras rotóricas de los motores de doble jaula (a) y de ranura profunda (b, c, d, e)

En el momento del arranque, la frecuencia de las corrientes del rotor es igual a la de la red y la reactancia de las jaulas alcanza su valor máximo. Por ello, al arrancar la jaula exterior presenta menos impedancia y las corrientes rotóricas circulan preferentemente por ella. Se consigue así un elevado par de arranque, pues el rotor presenta una resistencia alta.

A medida que el motor adquiere velocidad, disminuye la frecuencia rotórica y varía el reparto de corrientes entre las dos jaulas, aumentando la corriente de la jaula interior y disminuyendo la corriente de la jaula exterior. En régimen normal, la frecuencia rotórica es muy pequeña y las reactancias de las jaulas son despreciables, de tal manera que la corriente circula casi exclusivamente por la jaula interior por ser la de menor resistencia.

Por lo tanto, en los motores de doble jaula el arranque se realiza con una resistencia elevada en el rotor que paulatinamente va disminuyendo a medida que el motor alcanza velocidad. El proceso de arranque presenta, pues, una gran similitud con el de los motores de rotor bobinado.

Los **motores de ranura profunda** tienen una jaula cuyos conductores tienen una forma tal que su parte inferior presenta pequeña resistencia y alta autoinducción y la parte superior presenta alta resistencia y baja autoinducción (Fig. 22 b, c, d, e). Su comportamiento, por tanto, es similar al de los motores de doble jaula: en el arranque la corriente se concentra en la parte superior de los conductores (de alta resistencia) y en marcha normal la corriente circula preferentemente por la parte inferior, consiguiéndose así un elevado par de arranque.

De lo anterior se deduce que en los motores de doble jaula y de ranura profunda los parámetros R'_2 y X'_2 (y, consecuentemente, también R_{cc} y R'_c) no son constantes, sino que son funciones de la frecuencia rotórica f_2 . Dado que se cumple la relación (4), si el motor es alimentado con corrientes de frecuencia f_1

constante, se tiene que los parámetros R'_2 y X'_2 (y R_{cc} y R'_c) son sólo funciones del deslizamiento s .

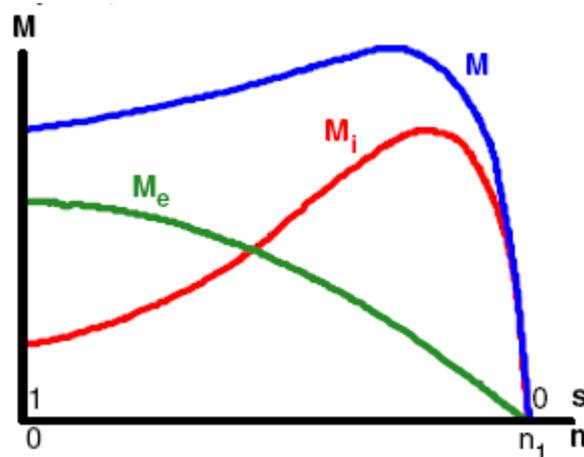


Fig. 23: Curva par-velocidad de un motor de doble jaula

Por lo tanto, para analizar el comportamiento de un motor de doble jaula o de ranura profunda se pueden utilizar los circuitos equivalentes de las Figs. 10 y 12 teniendo el cuidado de dar a R'_2 y a X'_2 en cada caso el valor correspondiente al deslizamiento del punto de funcionamiento que se quiere estudiar. De todos modos, con pequeños deslizamientos (inferiores o iguales al deslizamiento asignado) los parámetros del rotor prácticamente mantienen el mismo valor y se pueden considerar constantes. Esto permite estudiar estos motores como si fueran de una sola jaula cuando funcionan con deslizamientos pequeños.

La curva de par-velocidad de un motor de doble jaula (M en la Fig. 23) se puede obtener como suma de las correspondientes a cada una de sus jaulas (M_i de la jaula interior y M_e de la jaula exterior en la Fig. 23).

REGULACIÓN DE VELOCIDAD

De las fórmulas de la velocidad de sincronismo (1) y del deslizamiento (2) se deduce que:

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60 f_1}{p} (1 - s) \dots\dots\dots 54$$

Esto indica que se puede regular la velocidad de un motor asíncrono modificando su número de polos, la frecuencia del estator o el deslizamiento.

La **regulación por variación del número de polos** únicamente permite alcanzar unos pocos valores de velocidad diferentes, ya que el número de pares de polos p sólo puede adoptar valores enteros y, en consecuencia, no se puede

variar de forma continua. Se utiliza en máquinas de **jaula de ardilla** que en el estator disponen, bien de dos devanados independientes, cada uno de ellos con un número de polos diferente; o bien de un devanado especial que admite diferentes formas de conexión para modificar su número de polos.

La **regulación por variación del deslizamiento** se puede realizar variando la tensión de alimentación, introduciendo resistencias en serie con las fases del rotor o conectando el rotor a un **variador de frecuencias** (es decir, a una fuente de tensión que permite variar electrónicamente el valor eficaz y la frecuencia de las tensiones que suministra). Los dos últimos procedimientos sólo se pueden utilizar en máquinas de rotor bobinado.

La **regulación por variación de la frecuencia** consiste en variar la frecuencia f_1 de las corrientes del estator con lo que se modifica la velocidad de sincronismo n_1 de la máquina. Para ello se alimenta el estator a través de un variador de frecuencias.

Este sistema permite variar la velocidad de forma continua entre un amplio margen de velocidades. Para frecuencias f_1 por debajo de la asignada interesa variar la tensión V_1 del estator en función de la frecuencia de forma que el flujo por polo Φ_M sea el mismo para todas las frecuencias. De esta manera se consigue que para todas las frecuencias el par que suministra la máquina a la corriente asignada sea el mismo (el par asignado) y que también a todas las frecuencias el par máximo sea el mismo (Fig. 24). Para frecuencias f_1 por encima de la asignada no se puede mantener el flujo por polo Φ_M constante porque entonces la f.e.m. E_1 sería mayor que en condiciones asignadas (según se aprecia en la ecuación (7)), lo que conllevaría que la tensión en el estator fuera superior a la asignada. Por lo tanto, para frecuencias por encima de la asignada se mantiene el valor eficaz de las tensiones del estator igual al asignado.

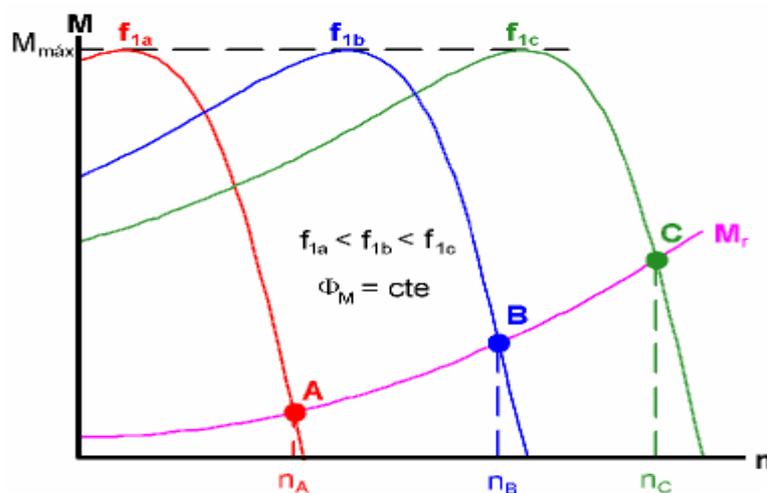


Fig. 24: Regulación de la velocidad por variación de la frecuencia f_1 manteniendo el flujo por polo Φ_M constante ($f_{1c} = f_{1N}$)

FRENADO

Entendemos que una máquina eléctrica funciona como freno cuando ejerce un par de frenado; es decir, de sentido contrario a su velocidad. Dependiendo de cómo sea el par de la carga, se tiene que el comportamiento del sistema máquina eléctrica-carga cuando la primera actúa como freno es así:

- Si la carga deja de actuar como tal y pasa a ejercer un par motor, el sistema buscará un punto de funcionamiento en el que se equilibre este par con el de frenado de la máquina eléctrica y la velocidad alcanzará un valor constante.

Esto es lo que sucede cuando un vehículo eléctrico desciende una pendiente. Mientras subía la pendiente la máquina eléctrica ejercía un par motor que tenía que vencer al par resistente debido al peso y a los rozamientos. Cuando el vehículo desciende la pendiente el par debido al peso pasa a ser un par motor y la máquina eléctrica la conectamos de modo que ejerza un par de frenado que impida que la velocidad aumente excesivamente.

- Si la carga sigue actuando como tal, se suman los pares de frenado de la carga y de la máquina eléctrica provocando la disminución de la velocidad, que incluso puede llegar hasta la detención del sistema máquina eléctrica-carga.

Esto es lo que sucede cuando un vehículo eléctrico circula en un trayecto plano. La máquina actúa, en principio, como motor y los rozamientos del vehículo constituyen la carga mecánica. Si ahora se desea frenar el vehículo, se conecta la máquina eléctrica como freno para que el vehículo disminuya su velocidad merced al efecto conjunto del par de frenado de la máquina eléctrica más el par de carga de los rozamientos.

Existen varios procedimientos para que una máquina asíncrona pase a actuar como freno.

Frenado por recuperación de energía (frenado regenerativo)

Consiste en hacer funcionar la máquina de inducción como generador, con lo cual ejerce un par de sentido contrario a la velocidad, según se apreció en la Fig. 14.

Para ello hay que conseguir que la velocidad de la máquina sea superior a su velocidad de sincronismo, bien aumentando la primera o bien disminuyendo la segunda.

Un ejemplo de esto es el vehículo que sube y baja una pendiente. Mientras sube, la máquina asíncrona actúa de motor y la velocidad es ligeramente inferior a la de sincronismo. Cuando baja, el vehículo aumenta su velocidad debido a la acción motora de la máquina de inducción y de su peso hasta que supera la velocidad de sincronismo. A partir de este momento, la máquina asíncrona comienza a girar con una velocidad superior a la de sincronismo y empieza a actuar de freno (de generador) alcanzándose el equilibrio cuando el par de frenado de la máquina iguale al debido al peso. De esta manera la máquina asíncrona "retiene" el vehículo impidiendo que alcance velocidades excesivas. La velocidad final será pues ligeramente superior a la de sincronismo. Como se aprecia en este ejemplo, una máquina de inducción pasa automáticamente a funcionar como freno regenerativo si el sistema se acelera y su velocidad sobrepasa a la de sincronismo.

Si la máquina de inducción está alimentada mediante un variador de frecuencias se la puede hacer actuar como generador sin que aumente su velocidad. Para ello hay que reducir la frecuencia f_1 de forma que la velocidad de sincronismo sea inferior a la de giro del rotor. De esta manera, disminuyendo gradualmente el valor de la frecuencia hasta valores muy bajos se puede ir reduciendo la velocidad hasta casi provocar la parada de la máquina.

En este frenado la máquina actúa como generador por lo que se puede recuperar la energía de frenado (menos la disipada en las pérdidas de la máquina) convirtiéndola en energía eléctrica que se devuelve a la red por el estator de la máquina asíncrona.

Frenado por contracorriente

En este frenado se invierte el sentido de giro del campo magnético con respecto al de giro del rotor, por lo que la máquina empieza a funcionar con un deslizamiento superior a 1 y a ejercer un par de frenado (ver la Fig. 14).

En este tipo de funcionamiento la máquina tiene unas corrientes muy elevadas (superiores a las de arranque) y se calienta mucho, lo que puede provocar su deterioro. Por esta razón, no debe emplearse más que en casos excepcionales o en motores especialmente diseñados. A veces se utilizan sistemas similares a los de arranque (disminuir la tensión del estator o añadir resistencias en serie con el rotor) para reducir las corrientes durante este tipo de frenado.

En el caso de motores trifásicos la inversión del sentido de giro del campo magnético se consigue permutando la conexión de dos de las fases del estator.

En la Fig. 25 se muestra un ejemplo de este tipo de frenado cuando el par resistente M_r es debido a un rozamiento seco. Este es un par resistente constante, pero siempre de sentido contrario a la velocidad.

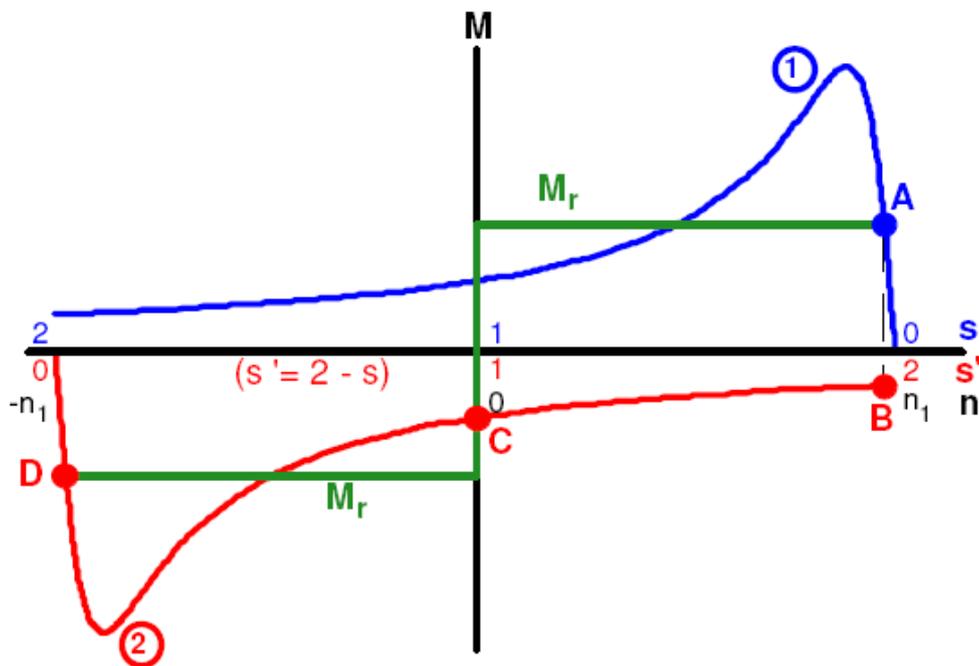


Fig. 25: Frenado a contracorriente

Cuando la máquina asíncrona tiene su campo magnético girando en sentido positivo (con velocidad \$n_1\$) ejerce el par dado por la curva (1) de la Fig. 25, el cual es similar al indicado en la Fig. 14. En estas condiciones, de acuerdo con la relación (2), cuando la máquina gira con una velocidad \$n\$ el deslizamiento \$s\$ viene dado por:

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1 - \frac{n}{n_1} \dots\dots\dots 55$$

Si se invierte el sentido de giro del campo giratorio, la velocidad de sincronismo pasa a ser \$-n_1\$ con lo que a la velocidad \$n\$ el deslizamiento ahora pasa a ser:

$$s' = \frac{-n_1 - n}{-n_1} = 1 + \frac{n}{n_1} = 2 - s \dots\dots\dots 56$$

Teniendo esto en cuenta y que ahora la máquina actuará como motor (con el deslizamiento \$s'\$ tomando valores entre 0 y 1) cuando su par sea negativo (del mismo sentido que la velocidad de sincronismo), se deduce que la máquina asíncrona a pasado a funcionar con la curva (2) de la Fig. 25.

En el ejemplo de la Fig. 25 el sistema inicialmente se encontraba en el punto A actuando la máquina asíncrona como motor venciendo el par resistente. Ahora se quiere frenar rápidamente el sistema. Se invierten las conexiones de las fases del primario para conseguir el cambio de sentido de giro del campo giratorio. Esta inversión se puede realizar muy rápidamente, de forma que

cuando ya se ha producido la inversión, la velocidad del rotor aún no le ha dado tiempo a cambiar debido a la inercia mecánica del conjunto máquina-carga. Esto hace que la curva de la máquina pase de ser la (1) a ser la (2) y el motor en el instante de la inversión pase a estar actuando como freno a contracorriente en el punto B. El sistema se ve ahora sometido a un par de frenado total que es la suma del de la máquina asíncrona y el par resistente M_r de la carga. Esto provoca que la velocidad vaya disminuyendo rápidamente hasta que la máquina se sitúa en el punto C cuando la velocidad se ha anulado. En este instante se debe desconectar la alimentación del estator de la máquina asíncrona. De no hacerse así, la máquina volvería a actuar como motor, pero girando en sentido negativo, y acabaría por funcionar en el punto estable D.

En el momento de la inversión, cuando la máquina aún no ha modificado su velocidad y pasa del punto A al B en la Fig. 25, se produce un aumento muy grande de la corriente.

Frenado por inyección de corriente continua (frenado dinámico)

En este procedimiento de frenado se alimenta el estator con corriente continua. De esta manera en el entrehierro de la máquina aparece un campo magnético fijo que induce f.e.m.s en los conductores del rotor si éste se está moviendo. Las corrientes rotóricas debidas a estas f.e.m.s se combinan con el campo magnético para producir un par que trata de evitar las variaciones de flujo sobre el devanado del rotor. Por lo tanto, este par intenta que el rotor no se mueva (para que los conductores rotóricos no "vean" un campo variable). Aparece, pues, un par de frenado.

Otra forma de comprender este funcionamiento es interpretar que en este caso la máquina funciona con un campo magnético giratorio cuya velocidad de sincronismo es nula (campo inmóvil).

Como en corriente continua en la ley de Ohm sólo intervienen las resistencias, pero no las reactancias, la tensión continua con que se alimenta el estator debe tener un valor pequeño para que no origine corrientes peligrosas.

MOTOR MONOFÁSICO DE INDUCCIÓN

En su forma básica un motor monofásico de inducción consiste en una máquina asíncrona de jaula de ardilla cuyo devanado del estator es monofásico.

El ***Teorema de Leblanc*** señala que un devanado monofásico 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. Cada uno de estos campos giratorios origina un par similar al de una máquina asíncrona polifásica (Fig. 14).

Si el motor gira a una velocidad n , el deslizamiento s_d del campo giratorio directo (el que gira en el mismo sentido que el motor) vale

$$s_d = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1 - \frac{n}{n_1} = s \quad \dots\dots\dots 57$$

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

$$s_i = \frac{(-n_1) - n}{(-n_1)} = 1 + \frac{n}{n_1} = 2 - s \quad \dots\dots\dots 58$$

La Fig. 26 representa los pares producidos por los dos campos giratorios (compárese con la Fig. 25 del frenado a contracorriente). El par M_i del campo inverso se opone al par M_d del campo directo, por lo que se representa hacia el lado negativo del eje de ordenadas. El par resultante M se obtiene sumando M_d y M_i .

Nótese que el par de arranque de este motor es nulo, pues a velocidad nula los deslizamientos s_d y s_i son iguales y los dos campos giratorios ejercen pares de igual valor y sentidos opuestos, por lo que se anulan entre sí.

Sin embargo, las relaciones (57) y (58) (nótese su similitud con las (55) y (56)) 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.

Como el par inverso M_i se opone al par directo M_d , este motor consume más corriente que si sólo actuase un único campo giratorio.

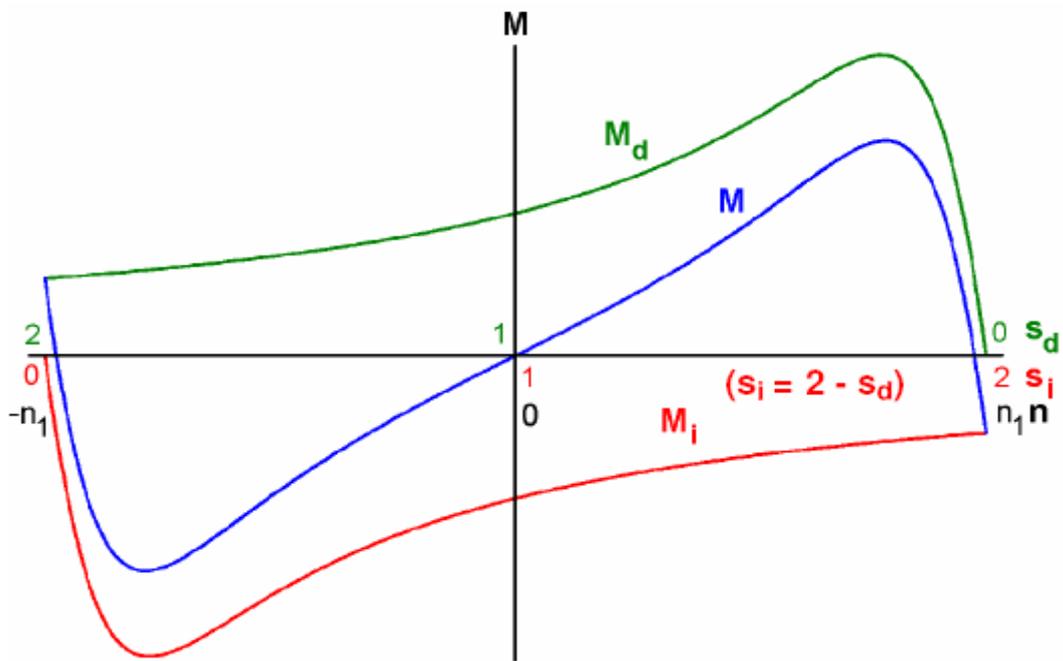


Fig. 26: Curva Par-velocidad de un motor monofásico de inducción

El análisis de los motores monofásicos de inducción se realiza mediante el circuito equivalente de la Fig. 27.

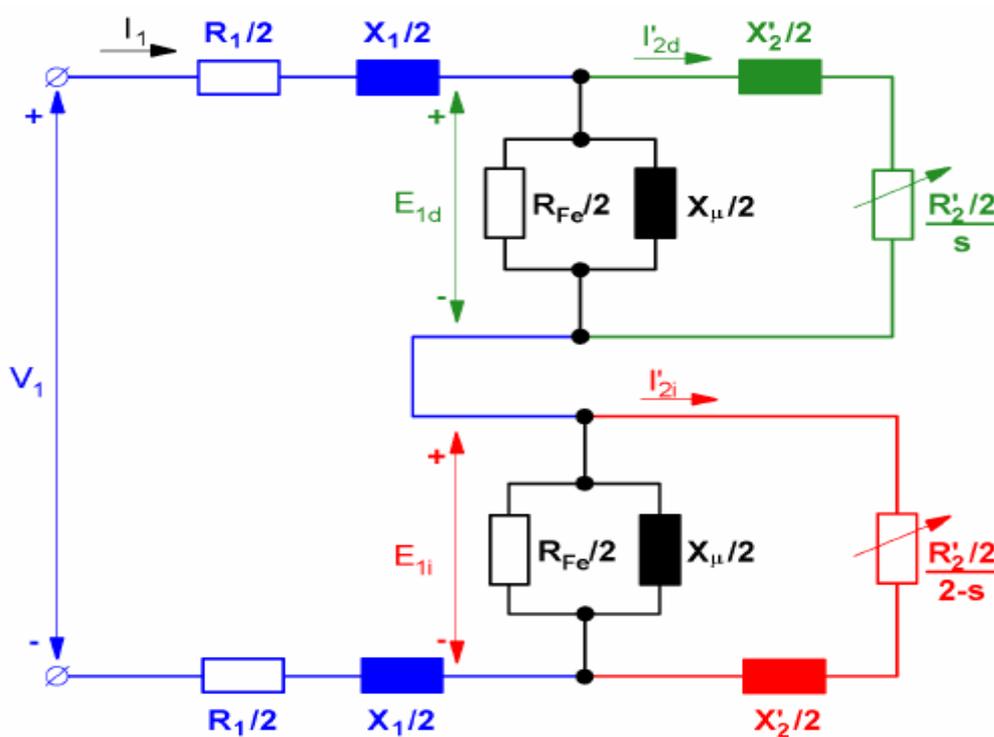


Fig. 27: Circuito equivalente de un motor monofásico de inducción

El principal inconveniente de los motores monofásicos de inducción es que tienen un par de arranque nulo. Existen variantes del motor monofásico que consiguen superar este problema haciendo que el motor se comporte como bifásico. Así se tienen los motores monofásicos con arranque por condensador y de fase partida.

Motores con arranque por condensador

Los motores monofásicos con arranque por condensador poseen en su estator dos devanados desfasados entre sí 90° eléctricos en el espacio; uno de ellos se denomina **principal** y 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 aproximadamente desfasadas 90° en el tiempo y sus módulos sean iguales (Fig. 28).

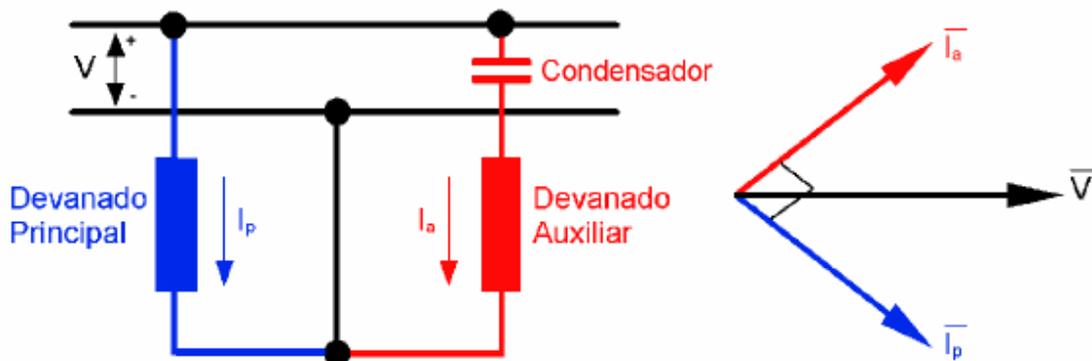


Fig. 28: Motor monofásico de condensador

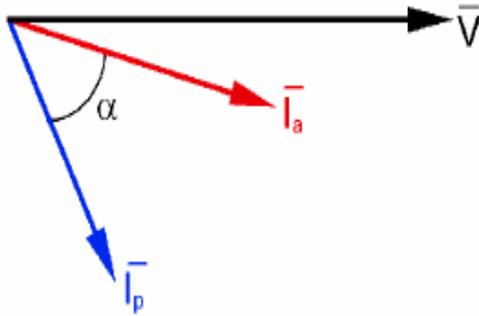
Al circular unas corrientes de iguales valores eficaces y desfasadas entre sí 90° en el tiempo por unos devanados desfasados 90° eléctricos en el espacio la máquina se comporta como un motor bifásico y se genera un campo magnético giratorio que hace girar al motor.

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.

Motores de fase partida

Los motores de fase partida poseen también dos devanados desfasados 90° eléctricos entre sí. El devanado principal tiene gran reactancia y baja resistencia

y el devanado auxiliar tiene gran resistencia y baja reactancia. Así se consigue que las corrientes que circulan por ambos devanados estén desfasadas entre sí un ángulo α (Fig. 29).



Las intensidades que circulan por ambos devanados, I_a e I_p , no tienen un desfase de 90° , por lo que no se obtiene un campo giratorio perfecto (de amplitud constante) sino un campo magnético giratorio de amplitud variable. Aún así, este campo logra hacer girar el rotor con lo que se consigue el arranque del motor. Una vez que el motor ha arrancado, un interruptor centrífugo desconecta automáticamente el devanado auxiliar y el motor queda funcionando como monofásico simple.

Fig. 29: Diagrama vectorial de un motor de fase partida

Diagrama Energético Del Motor Eléctrico

Cuando el motor está en funcionamiento, el estator se alimenta de la red y absorbe una potencia:

$$P_1 = M_1 \times V_1 \times I_1 \times \cos \phi_1$$

Parte de la P_1 se consume (disipa) en la resistencia R del devanado del estator ocasionando una pérdida eléctrica ΔP_{el1} , así como una pérdida magnética en el campo del estator. ΔP_{mag} , deduciendo dichas componentes, al rotor se le aplica una potencia electromagnética, que se expresa mediante la siguiente ecuación de balance energético:

$$P_{elmag} = P_1 - \Delta P_{el1} - \Delta P_{mag}$$

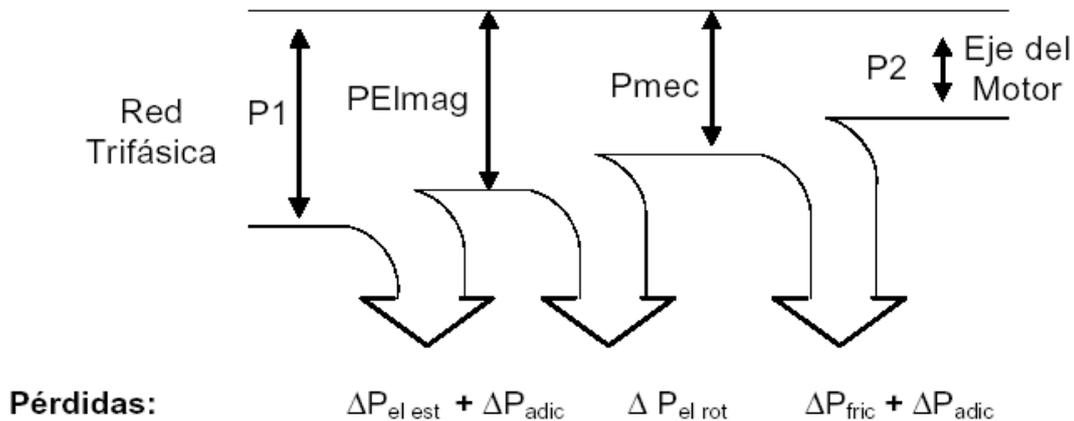
Parte de esta potencia se disipa en cubrir las pérdidas eléctricas del rotor ΔP_{el2} en su devanado, la potencia resultante es aquella que va a ser convertida en potencia mecánica, expresado por:

$$P_{mec} = P_{elmag} - \Delta P_{el2}$$

En las máquinas de anillos rozantes, además se tienen pérdidas en las escobillas de contacto, las cuales se añades a la pérdida ΔP_{el2} .

La potencia mecánica obtenida en el árbol del eje del rotor, se obtiene luego de vencer su inercia y otras pérdidas adicionales, obteniéndose una potencia P_2 :

$$P_2 = P_{mec} - \Delta P_{fric} - \Delta P_{adic}$$



Relación Entre Eficiencia (η) Y Deslizamiento (S) en Motores

Para definir la relación entre la Eficiencia η y el Deslizamiento s en los motores, se analiza la eficiencia mediante la relación:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{P_{el\ mag}}{P_1} \right) \times \left(\frac{P_2}{P_{el\ mag}} \right) = \eta_1 \times \eta_2$$

Donde η_1 y η_2 son las eficiencias del estator y del rotor

Teniendo en cuenta:

$$\eta_2 = \frac{P_2}{P_{el\ mag}} = \frac{P_{el\ mag} - \Delta P_{el2} - \Delta P_{fric} - \Delta P_{adic}}{P_{el\ mag}}$$

Entonces es válida la siguiente relación:

$$\eta_2 < \frac{P_{el\ mag} - \Delta P_{el2}}{P_{el\ mag}} < \frac{1 - \Delta P_{el2}}{P_{el\ mag}} < (1 - S)$$

Del análisis realizado se puede concluir con lo siguiente:

Para que un motor funcione en su régimen nominal con una alta eficiencia, es necesario que en este régimen se tenga un deslizamiento s de pequeña

magnitud. Por lo general $s_{nom} = 0.01 - 0.06$, para ello el devanado del rotor lo diseñan de tal forma que tenga una resistencia óhmica pequeña.

Selección de motor eléctrico

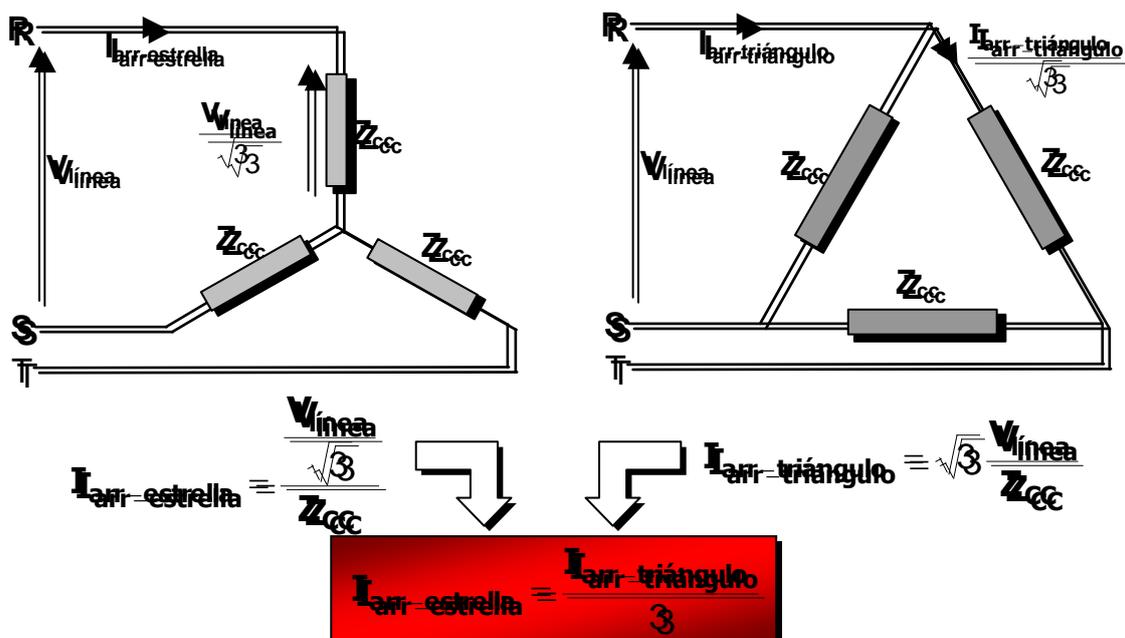
Para la selección de un motor eléctrico debemos tener en cuenta el medio y condiciones de trabajo, la red de alimentación y la carga accionada junto con las características de servicio; a fin de determinar con precisión el tipo de carcasa, la potencia en función del par de arranque, la velocidad, la forma y posición, la tensión y frecuencia de operación, clase de aislamiento y características mecánicas dependiendo de la aplicación.

Método para el arranque

El método que utilizaremos para el arranque será de estrella triángulo porque es el método mas sencillo mas barato, y el mas sencillo.

El arranque estrella - triángulo consiste en conectar los devanados del motor en estrella para arrancar la máquina conmutando a conexión en triángulo una vez que la máquina ha elevado su velocidad

El motor conectado en estrella consume menos corriente y entrega menos par. De este modo, se limita la corriente de arranque.



La Capacidad de Sobrecarga

La capacidad de sobrecarga que debo tener en mi sistema es de un 15% para de esta manera estará seguro de que mi sistema no correrá ningún riesgo por sobrecarga.

INERCIA DE LAS MASA ARRASTRADAS

FORMAS DE MONTAJE

MEDIO Y CONDICIONES DE TRABAJO

Temperatura Y Medio Refrigerante

El sistema estar instalado en un lugar donde existe un alto índice de humedad, donde la temperatura ambiente es aproximadamente es de 25°, y el medio refrigerante es el aire.

Altitud de Instalación

La instalación estar aproximadamente 100m sobre el nivel del mar

Condiciones Ambientales

El lugar de la instalación es un lugar donde no se trabaja con abundancia de agua, porque dicha empresa se dedica a la fabricación de materiales con plástico, y tampoco con cuerpos sólidos que pueden ser muy peligrosos para dañar el motor.

Con respecto al ambiente es un lugar donde el motor va ha tener un lugar especifico para su operación, que va ha estar a una buena distancia de aquellos objetos que puedan dañarlos, y es mas el motor junto con todo el sistema van ha esta dentro de un ambiente seguro que nos brindaran todas las condiciones seguras.

Red de Alimentación

- El sistema trabajar a una tensión de 440voltios.
- El sistema trabajar a una frecuencia de 60HZ

Selección de la Carcasa y el nivel de Protección

Primera cifra característica	Grado de protección	
	Descripción abreviada	Definición
0	No protegido	Ninguna protección especial
1	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 50mm.	Una gran superficie del cuerpo humano, por ejemplo la mano (pero ninguna protección contra una penetración deliberada). Cuerpos sólidos de más de 50mm de diámetro.
2	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 12mm.	Los dedos u objetos de tamaños similares que no excedan de 80 mm de longitud. Cuerpos sólidos de más de 12 mm de diámetro.
3	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 2.5mm.	Herramientas, alambres, etc., de diámetro o de espesores superiores a 2.5mm. Cuerpos sólidos de más de 2.5 mm de diámetro.
4	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 1mm.	Alambres o bandas de espesor superior a 1.0mm. Cuerpos sólidos de más de 1.0mm de diámetro.
5	Protegido contra el polvo	No se impide del todo la penetración del polvo, pero este no puede penetrar en cantidad suficiente como para perjudicar el buen funcionamiento del material.
6	Totalmente protegido contra el polvo	No hay penetración de polvo

Segunda cifra característica	Grado de protección	
	Descripción abreviada	Definición
0	No protegido.	Ninguna protección especial.
1	Protegido contra las caídas verticales de gotas de agua.	Las gotas de agua (que caen verticalmente) no deben producir efectos perjudiciales.
2	Protegido contra las caídas de agua con una inclinación máxima de 15°.	La caída vertical de gotas de agua no debe producir efectos perjudiciales cuando la envolvente está inclinada hasta 15° de su posición normal.
3	Protegido contra el agua en forma de lluvia.	El agua que caiga en forma de lluvia en una dirección que tenga respecto a la vertical un ángulo inferior o igual a 60° no debe producir efectos perjudiciales.
4	Protegido contra proyecciones de agua.	El agua proyectada sobre el envolvente desde cualquier dirección, no debe producir efectos perjudiciales.
5	Protegido contra los chorros de agua.	El agua lanzada sobre el envolvente por una boquilla desde cualquier dirección, no debe producir efectos perjudiciales.
6	Protegido contra los embates del mar.	Con mar gruesa o mediante chorros potentes, el agua no deberá penetrar en la envolvente en cantidad perjudicial.
7	Protegidos contra los efectos de la inmersión.	No debe ser posible que el agua penetre en cantidad perjudicial en el interior de la envolvente sumergida en agua, con una presión y un tiempo determinado.
8	Protegido contra la inmersión prolongada.	El material es adecuado para la inmersión prolongada en agua en las condiciones especificadas por el fabricante.

Selección de Temperatura

Clase de aislamiento	Temperatura máxima °C
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
200	200
220	220
250	250

Por Grado de Protección del motor:

IP xy

- **IP:** International Protection.
- **x:** Protección contra contacto y penetración de sólidos (solids).
- **y:** Protección contra penetración de agua (water).



Tabla 1 - Grados de protección indicados por la primera cifra característica

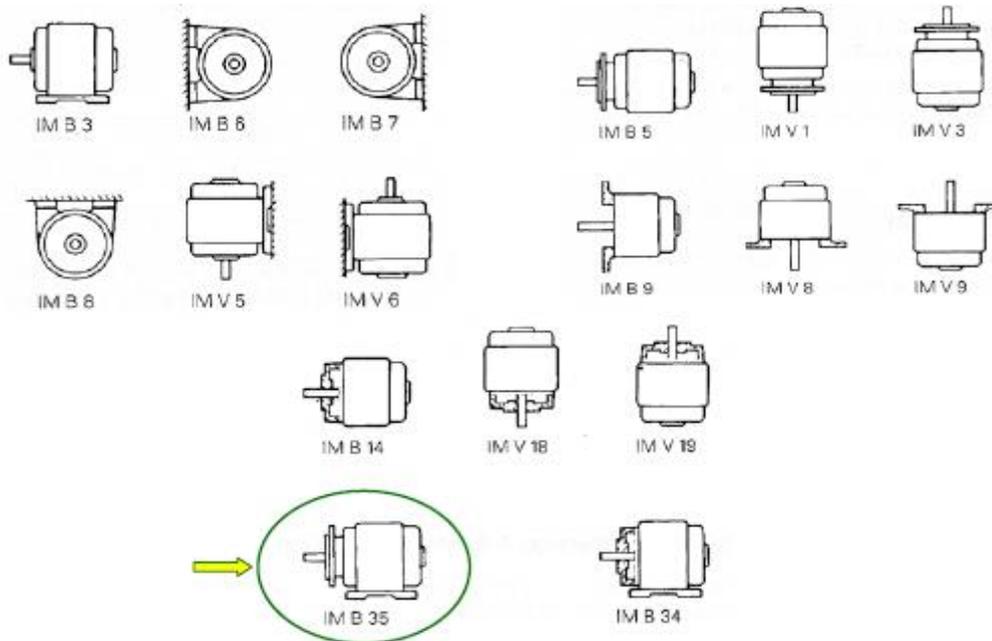
Cifra	Grado de protección	
	Descripción abreviada	Indicación breve sobre los objetos que no deben penetrar en la envolvente
0	No protegida	Sin protección particular
1	Protegida contra los cuerpos sólidos de más de 50 mm	Cuerpos sólidos con un diámetro superior a 50 mm.
2	Protegida contra los cuerpos sólidos de más de 12 mm.	Cuerpos sólidos con un diámetro superior a 12 mm.
→ 3	Protegida contra cuerpos sólidos de más de 2,5 mm.	Cuerpos sólidos con un diámetro superior a 2,5 mm.

Tabla 2 - Grados de protección indicados por la segunda cifra característica

Cifra	Grado de protección	
	Descripción abreviada	Tipo de protección proporcionada por la envolvente
0	No protegida	Sin protección particular
1	Protegida contra la caída vertical de gotas de agua	La caída vertical de gotas de agua no deberán tener efectos perjudiciales
2	Protegida contra la caída de gotas de agua con una inclinación máxima de 15°	Las caídas verticales de gotas de agua no deberán tener efectos perjudiciales cuando la envolvente está inclinada hasta 15° con respecto a la posición normal
3	Protegida contra la lluvia fina (pulverizada)	El agua pulverizada de lluvia que cae en una dirección que forma un ángulo de hasta 60° con la vertical, no deberá tener efectos perjudiciales
→ 4	Protegida contra las proyecciones de agua	El agua proyectada en todas las direcciones sobre la envolvente no deberá tener efectos perjudiciales

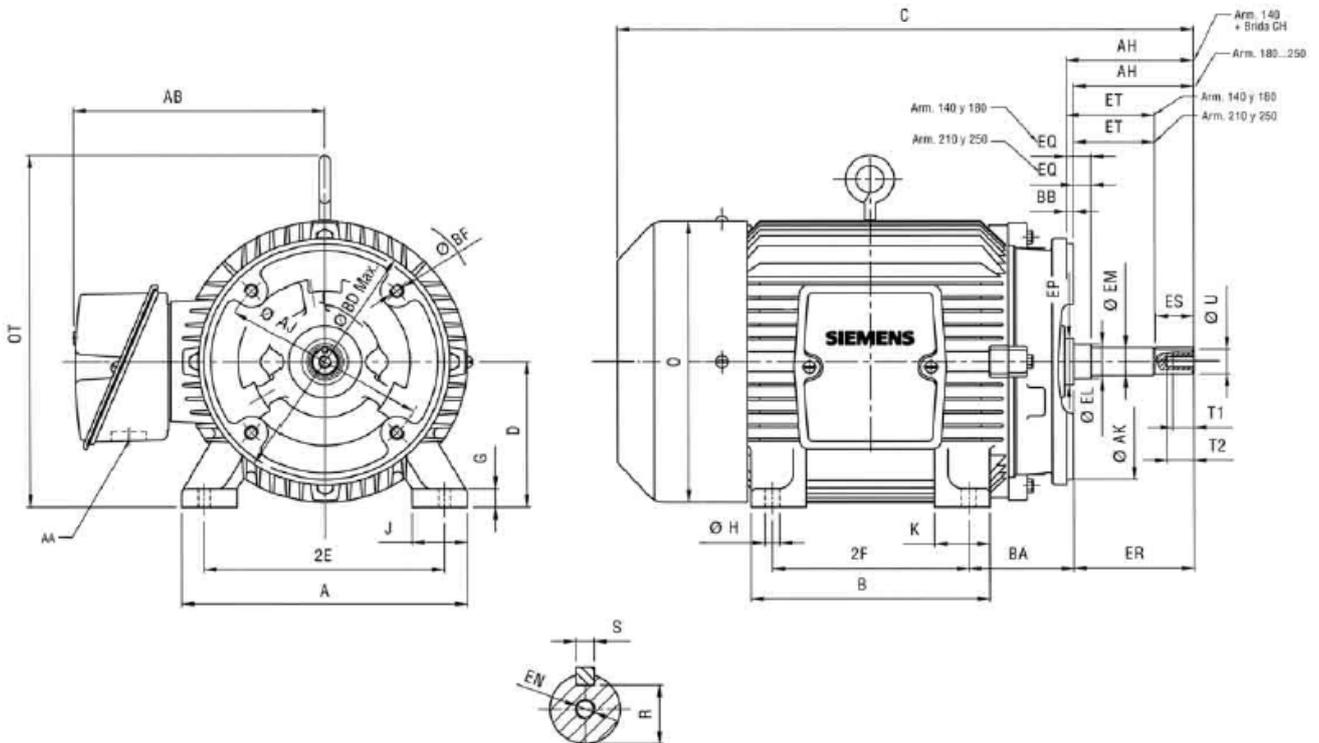
Por Posición del Motor:

Para el tipo de trabajo que va realizarse se seleccionara un motor en forma horizontal, según el catálogo de motores normalizados de la Siemens.

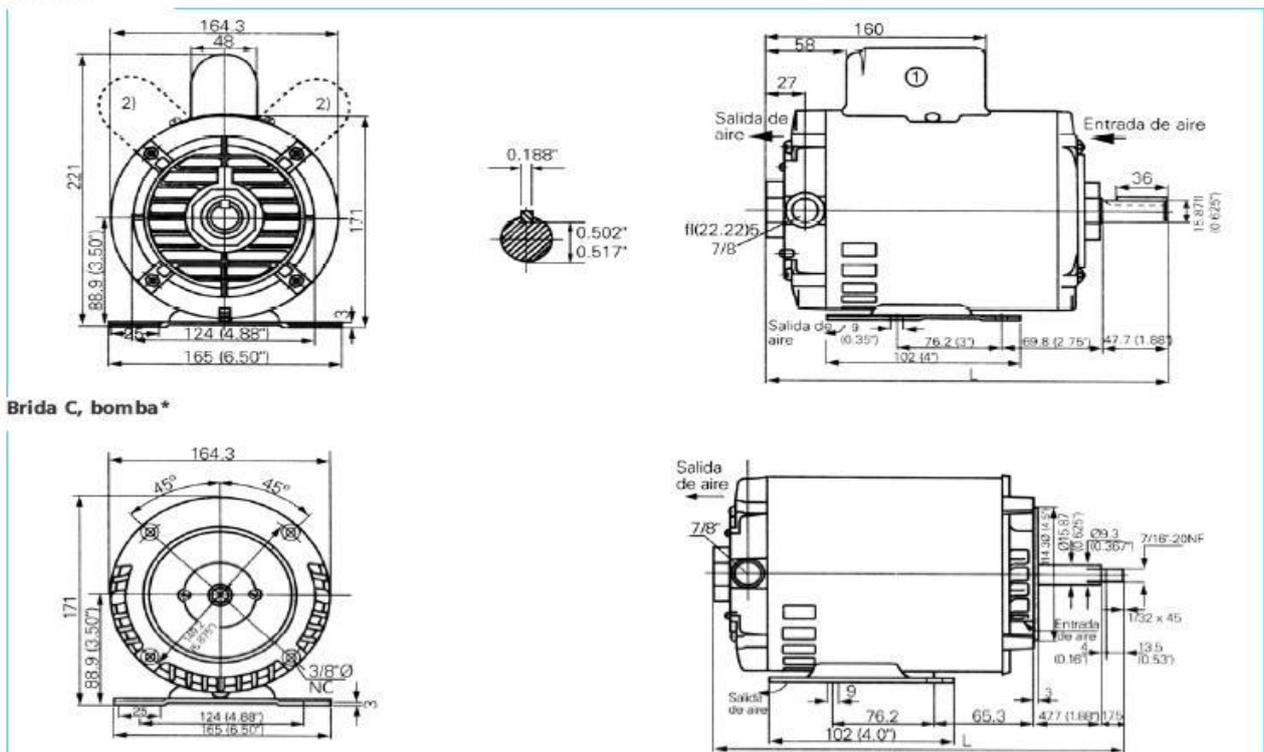


Abreviaturas de las formas constructivas		
IEC CODIGO I	IEC CODIGO II	DIN
IM B3	IM 1001	B3
IM B6	IM 1051	B6
IM B7	IM 1061	B7
IM B8	IM 1071	B8
IM V5	IM 1011	V5
IM V6	IM 1031	V6
IM B5	IM 3001	B5
IM V1	IM 3011	V1
IM V3	IM 3031	V3
IM B14	IM 3601	B14
IM V18	IM 3611	V18
IM V19	IM 3631	V19
IM B35	IM 2001	B3 / B5
IM B34	IM 2101	B3 / B14
IM B9	IM 9101	B9
IM V8	IM 9111	V8
IM V9	IM 9131	V9
IM B10	IM 4001	B10
IM V10	IM 4011	V10
IM V14	IM 4031	V14

Medidas de la carcasa del motor



Estándar



Armazón	U	AH	AJ	AK	BB	EQ	BD max	BF diam. roscado	BF #
143JM	22.22 0.875"	108.3 4.26"	149.2 5.875"	114.3 4.5"	4 0.16"	15.8 0.625"	165.1 6.5"	3/8" - 16 NC	4
145JM	22.22 0.875"	108.3 4.26"	149.2 5.875"	114.3 4.5"	4 0.16"	15.8 0.625"	165.1 6.5"	3/8" - 16 NC	4
182JMY y 184JMY	22.22 0.875"	108.3 4.26"	184.1 7.25"	215.9 8.5"	6.3 0.25"	15.8 0.625"	228.6 9"	1/2" - 13 NC	4
182JM y 184JM	22.22 0.875"	108.3 4.26"	149.2 5.875"	114.3 4.5"	4 0.16"	15.8 0.625"	165.1 6.5"	3/8" - 16 NC	4
213JM y 215JM	22.22 0.875"	108.3 4.26"	184.1 7.25"	215.9 8.5"	6.3 0.25"	15.8 0.625"	228.6 9"	1/2" - 13 NC	4
254JM y 256JM	31.75 1.25"	133.3 5.25"	184.1 7.25"	215.9 8.5"	6.3 0.25"	15.8 0.625"	254 10"	1/2" - 13 NC	4
284JM y 286JM	31.75 1.25"	133.3 5.25"	279.4 11"	317.5 12.5"	6.3 0.25"	15.4 0.605"	355.6 14"	5/8" - 11 NC	4
324JM y 326JM	31.75 1.25"	133.3 5.25"	279.4 11"	317.5 12.5"	6.3 0.25"	15.4 0.605"	355.6 14"	5/8" - 11 NC	4

Armazón	EL	EM	R	EP Min	ER Min	ET	S	EN	ES Min
143JM	29.36 1.532"	25.4 1"	19.58 0.771"	29.361 532	108 4.25"	73 2.875"	4.78 0.188"	3/8" - 16 UNC	42 1.65"
145JM	31.7 1.25"	25.4 1"	19.58 0.771"	31.7 1.25"	108 4.25"	73 2.875"	4.78 0.188"	3/8" - 16 UNC	42 1.65"
182JMY y 184JMY	31.7 1.25"	25.4 1"	19.58 0.771"	31.7 1.25"	108 4.25"	73 2.875"	4.78 0.188"	3/8" - 16 UNC	42 1.65"
182JM y 184JM	31.7 1.25"	25.4 1"	19.58 0.771"	31.7 1.25"	108 4.25"	73 2.875"	4.78 0.188"	3/8" - 16 UNC	42 1.65"
213JM y 215JM	31.7 1.25"	25.4 1"	19.58 0.771"	44.4 1.752"	108 4.25"	73 2.875"	4.78 0.188"	3/8" - 16 UNC	42 1.65"
254JM y 256JM	44.4 1.75"	39.4 1.375"	28.24 1.112"	44.4 1.752"	133 5.25"	76.2 3"	6.35 0.25"	1/2" - 13 UNC	64.3 2.53"
284JM y 286JM	44.4 1.75"	39.4 1.375"	27.86 1.097"	53.97 2.125"	133 5.25"	76.2 3"	6.35 0.25"	1/2" - 13 UNC	64.3 2.53"
324JM y 326JM	44.4 1.75"	39.4 1.375"	27.86 1.097"	53.97 2.125"	133 5.25"	76.2 3"	6.35 0.25"	1/2" - 13 UNC	64.3 2.53"

Aseguramiento de calidad

Además de incorporar materiales de alta calidad, cada motor Siemens pasa por más de 100 distintas inspecciones de calidad antes de salir de nuestra planta. Para que sea lo suficientemente bueno para ser ofrecido a Usted. La responsabilidad de nuestra gente ayuda a poner la confiabilidad extra en los motores Siemens.



Motor trifásico
uso general

Apoyo para elección del motor adecuado

Cuando Usted está seleccionando un motor, Siemens opina que Usted debe hablar con quien pueda apoyarle a elegir el accionamiento adecuado para el trabajo a desempeñar. Nuestros ingenieros de ventas tienen el conocimiento y experiencia para ayudarle a resolver cualquier problema de aplicación, diseño o instalación.



Motor trifásico
abierto armazón 56

2

Eficiencia en operación ahora y en el futuro cuando ésta más se necesita

Los motores Siemens están diseñados para ser resistentes en el trabajo y operan tan eficientemente que Usted estará sorprendido con su ahorro de energía. Las diferencias que Siemens le ofrece le dan más motor por su dinero y más ahorro a largo plazo.

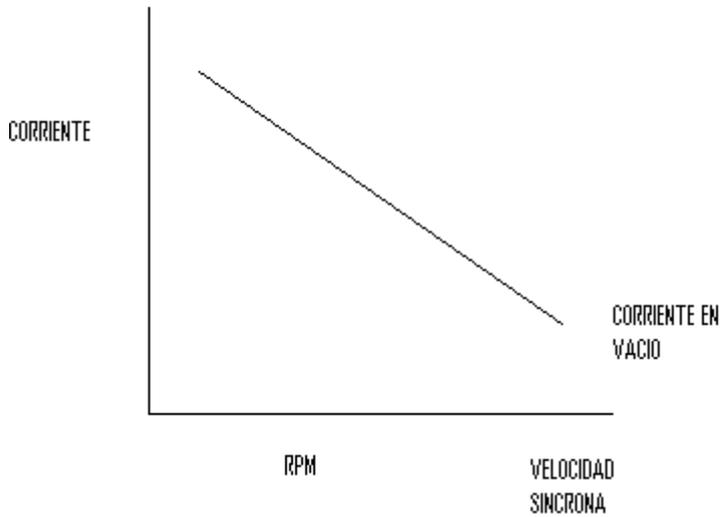


Motor trifásico
a prueba de explosión

GRAFICAS

GRAFICO I

CORRIENTE ABSORVIDA EN FUNCION DE LA VELOCIDAD

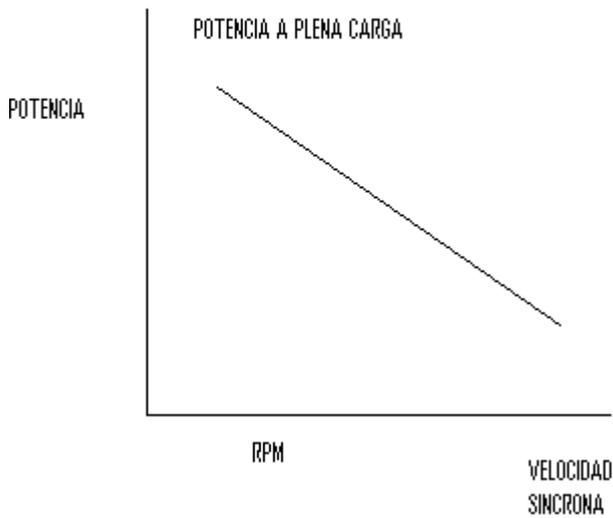


DATOS DE PLACA:

FABRICANTE:EPLI
TENSION:220
CORRIENTE:1.5A
VELOCIDAD:1200
POLOS:6

GRAFICO II

POTENCIA ELECTRICA ABSORVIDA EN FUNCION A LA VELOCIDAD

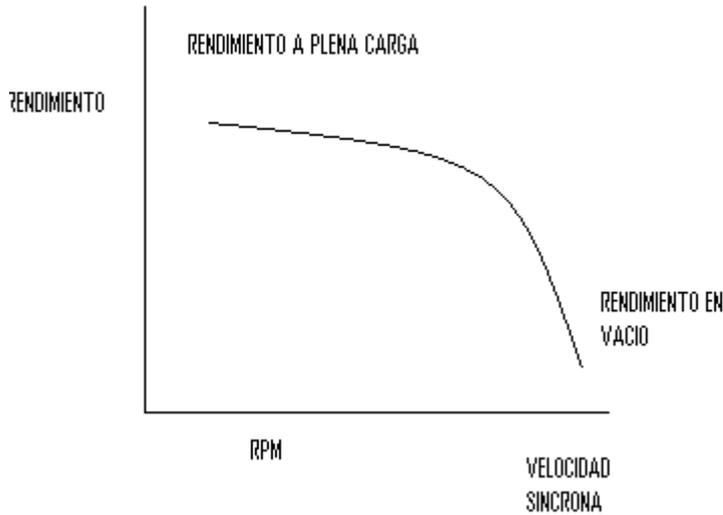


DATOS DE PLACA:

FABRICANTE:EPLI
TENSION:220
CORRIENTE:1.5A
VELOCIDAD:1200
POLOS:6

GRAFICOS III

RENDIMIENTO EN FUNCION A LA VELOCIDAD

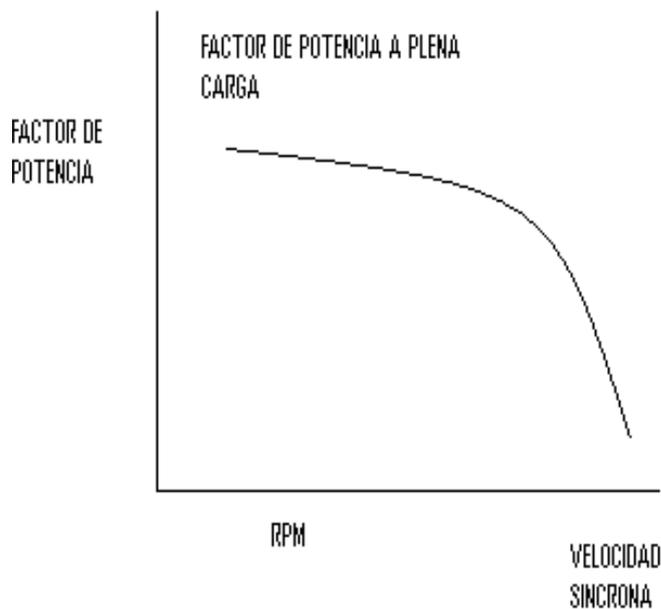


DATOS DE PLACA:

FABRICANTE:EPLI
 TENSION:220
 CORRIENTE:1.5A
 VELOCIDAD:1200
 POLOS:6

GRAFICOS IV

FACTOR DE POTENCIA EN FUNCION DE LA VELOCIDAD

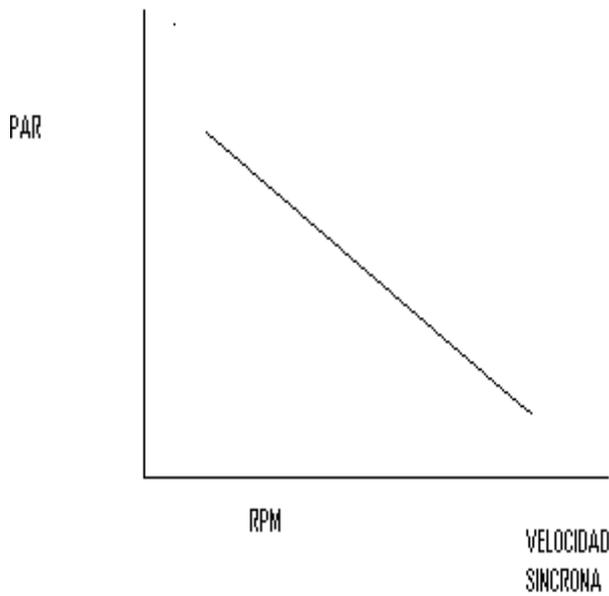


DATOS DE PLACA:

FABRICANTE:EPLI
 TENSION:220
 CORRIENTE:1.5A
 VELOCIDAD:1200
 POLOS:6

GRAFICOS V

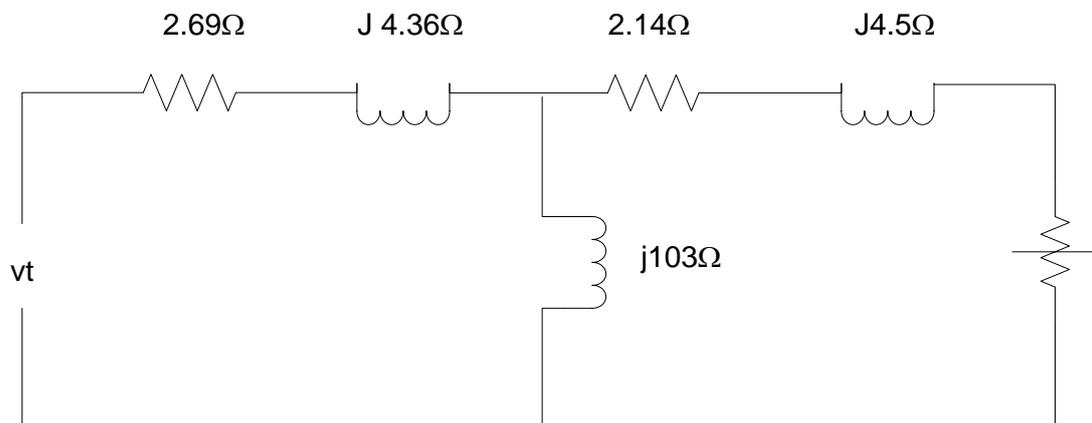
PAR EN FUNCION DE LA VELOCIDAD



DATOS DE PLACA:

FABRICANTE: EPLI
 TENSION: 220
 CORRIENTE: 1.5A
 VELOCIDAD: 1200
 POLOS: 6

DATOS DE SELECCIÓN



Bueno para nuestro calculo elegimos un motor de inducción trifásico de rotor jaula de ardilla de 2.7kw - 440v, que va ha funcionar a una frecuencia determinada de 60Hz, además nuestro motor es de 4 polos.

Dentro de las tablas de motores pudimos encontrar las características del motor elegido, entonces dentro de los parámetros de las características del motor a su plena carga encontramos lo siguiente:

Nos hace referencia que las pérdidas rotacionales equivalían a 166W y sus pérdidas dispersas a 48w

Para nuestro caso el motor a su plena carga deberá de trabajar con un deslizamiento del 5%, ya que este valor esta dentro del rango estipulado, y además es un valor aceptable para que el motor en el funcionamiento no presente complicaciones de temperatura por ejemplo.

Entonces para determinar los para metros básicos para la selección del motor realizaremos lo siguiente:

Cálculos Justificativos

$$\bar{Z}_s = 2.69 + j4.36 = 5.13 \angle 58.3^\circ \Omega$$

$$\bar{X}_m = 103 \angle 90^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_r = \frac{2.14}{0.05} + j4.5 = 43.04 \angle 6^\circ \Omega$$

Luego determinamos las corrientes:

$$\bar{I}_s = 4.15 \angle -34^\circ A$$

$$\bar{I}_r = 5.455 \angle -8.14^\circ \Omega$$

$$W_{EJE} = 2.7 KW$$

Las pérdidas rotoricas y dispersas:

$$\Delta W_{ROT+DIS} = 214 W$$

$$W_{INTERNA} = 2.7 KW + 0.214 KW$$

$$W_{INTERNA} = 2.914 KW$$

El Torque interno sería:

$$T = \frac{W_{INTERNA}}{(1-S)W_s}$$

$$T = \frac{2.914}{(0.95) \left(\frac{2\pi 60}{2} \right)}$$

$$T = 16.31N - m$$

$$\Delta W_{CU_STATOR} = 3 \times 2.69 \times 4.15^2$$

$$\Delta W_{CU_STATOR} = 139W$$

$$\Delta W_{CU_ROTOR} = 3 \times 2.14 \times 5.455^2$$

$$\Delta W_{CU_ROTOR} = 191.04W$$

Entonces ahora podemos calcular nuestras perdidas totales:

$$\Delta W_{TOTALES} = 191.04 + 139 + 166 + 48$$

$$\Delta W_{TOTALES} = 544.04W$$

Entonces nuestra potencia de entrada es :

$$W_{ENTRADA} = W_{EJE} + \Delta W$$

$$W_{ENTRADA} = 2.7KW + 0.54404KW$$

$$W_{ENTRADA} = 3.244KW$$

Por lo tanto mi eficiencia será:

$$e = \left(1 - \frac{\Delta W}{W_{ENTRADA}} \right) \times 100$$

$$e = \left(1 - \frac{0.54404}{3.244} \right) \times 100$$

$$e = 83\%$$

Elección del Motor Eléctrico para el Trabajo

Catálogo de la Siemens

Según los cálculos el motor a escoger según en el catálogo para un motor de 3 HP, es el siguiente:

Motores trifásicos

Datos característicos típicos en 440V
 Alta eficiencia, totalmente cerrados (TCVE)
 Tipos RGZE, RGZESD, RGZZESD
 220/440V 60 Hz. Diseño NEMA B, 40°C ambiente

HP	RPM sincrona	RPM asincrona	Amazón	Corriente (A)			Letra de código	Eficiencia nominal %			Factor de potencia %			Par			Conexión
				en vacío	plena carga	arranque		1/2	3/4	plena carga	1/2	3/4	plena carga	Nom. lb-pie	Rotor Bloq. %	Máx. %	
1	3600	3490	143T	0.8	1.4	12	K	73.7	78.3	80.0	77	86	90	1.5	280	340	Y
	1800	1745	143T	1.2	1.6	12	K	78.7	81.8	82.5	52	66	76	3.0	290	320	Y
	1200	1140	145T	1.4	1.9	9	J	76.4	78.8	80.0	42	56	62	4.6	230	290	Y
	900	860	182T	1.3	2.0	8	H	76.6	78.9	78.5	42	54	63	6.1	220	260	Y
1.5	3600	3485	143T	0.9	2.1	17	K	78.0	82.0	82.5	69	79	85	2.3	270	320	Y
	1800	1740	145T	1.5	2.3	18	K	80.7	83.5	84.0	54	67	76	4.5	290	320	Y
	1200	1160	182T	1.6	2.4	17	K	81.6	84.2	85.5	50	63	71	6.8	280	320	Y
	900	855	184T	1.9	2.7	14	H	78.0	80.4	80.0	45	58	68	9.2	220	270	Y
2	3600	3495	145T	1.2	2.6	23	K	79.9	83.2	84.0	73	83	89	3.0	270	320	Y
	1800	1735	145T	2.0	3.0	22	K	80.7	83.6	84.0	52	67	77	6.1	290	310	Y
	1200	1160	184T	2.0	3.1	23	K	84.5	86.0	86.5	50	63	72	9.1	220	300	Y
	900	865	213T	2.3	3.5	18	H	80.0	82.0	82.5	46	60	69	12	200	290	Y
3	3600	3510	182T	1.8	3.8	33	K	83.8	86.2	86.5	75	84	90	4.5	230	320	Y
	1800	1740	182T	1.9	4.1	31	K	87.5	88.0	87.5	65	76	82	9.1	260	300	Y
	1200	1165	213T	2.4	4.2	33	K	85.8	87.6	87.5	58	73	80	14	210	300	Y
	900	865	215T	3.2	4.9	27	H	82.5	84.2	84.0	48	62	71	18	190	280	Y
5	3600	3490	184T	1.9	6.1	48	J	86.5	87.8	87.5	82	89	92	7.5	260	320	Y
	1800	1730	184T	3.3	6.8	48	J	87.5	88.2	87.5	63	75	82	15	260	300	Y
	1200	1160	215T	3.5	7.1	48	J	89.0	89.7	88.5	59	71	78	23	210	300	Y
	900	865	254T	4.3	7.8	42	H	86.0	87.0	86.5	53	66	72	30	180	260	Y
7.5	3600	3515	213T	3.6	9.2	67	H	87.0	88.0	88.5	77	86	90	11	190	280	Y
	1800	1750	213T	4.4	9.9	67	H	89.0	90.0	89.5	66	77	93	23	210	270	Y
	1200	1170	254T	4.7	10	63	H	90.6	90.9	90.2	59	72	78	34	180	250	Y
	900	865	256T	6.9	13	67	H	87.0	88.0	87.5	49	61	69	46	190	260	Y

Costo del Motor Seleccionado

Características

- Potência: 3 HP
- Pólos: 4
- Freqüência: 60 Hz
- Conjugado: 12,2 Nm
- Tensão: 440 V
- Carcaça: 90L
- RPM: 1725
- In: 4,34 A
- Rendimento (100%): 83,1
- F.P. (100%): 0,80
- Isolamento: B
- Ruído: 51 dB(A)
- Corrente a vazio: 2,00 A
- Ip / In: 6,8



clique para ampliar 

 outras potências 

Pot	Carc.	In (A) 440 V	Ip / In	Cp / Cn	Cm / Cn	Rendimento (%)			Fator de Pot.			FS	Inércia	Tr (s)	Ruído	Massa
						50	75	100	50	75	100					
3 HP	90L	4,34 A	6,8	260 %	280 %	83,1	84,0	83,1	0,64	0,75	0,80	1,15	0,00672 kgm ²	6 s	51 dB(A)	23 kg