

Cuaderno Técnico nº 207

Los motores eléctricos ... mejorando su control y protección



E. Gaucheron



La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas.

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones señaladas con ⇒ **OnLine**, descargando o consultando el documento en pdf, en:

<http://www.schneiderelectric.es/formacion>

Cualquier comunicación con **Schneider Electric España S.A.** pueden realizarla a través de nuestras Delegaciones comerciales (ver contraportada), o bien para temas didácticos dirigirse a:

Centro de Formación Schneider
C/ Miquel i Badia, 8 bajos
08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80

Fax: (93) 219 64 40

e-mail: formacion@es.schneider-electric.com

Las colecciones de **Cuadernos Técnicos** y de **Publicaciones Técnicas**, forman parte de la «Biblioteca Técnica» de **Schneider Electric España S.A.**

Advertencia

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 207 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 207

Los motores eléctricos ... mejorando su control y protección



Etienne Gaucheron

Técnico Superior en Electrotecnia, de formación. Después de una breve estancia en Thomson, desarrolla la actividad VVD (Variación de Velocidad y Arrancadores) de Telemecánica en 1970; a continuación de su etapa de venta en Telemecánica completa su formación en Arts e Métiers de París.

Especialista en mando y control de motores, participa en la evolución de los sistemas de variación de velocidad para el control de motores de corriente alterna. Su experiencia se enriquece en los diversos puestos que ocupa: diseñador de sistemas, jefe de producto de variadores para máquinas herramienta, jefe de producto de variadores para motores asíncronos (productos Altivar) y responsable del equipo de marketing del proyecto VVD.

Actualmente es especialista en «aplicaciones» de control de motores en el equipo de anticipación para la actividad PCP (Protección y Control de Potencia) de Schneider Electric.

Trad.: J.M. Giró

Original francés: junio 2004

Versión española: marzo 2005



Los motores eléctricos

... mejorando su control y protección

Actualmente los receptores más utilizados, tanto en la industria como en las instalaciones terciarias, si exceptuamos los sistemas de alumbrado, son los motores eléctricos. Su función, convertir energía eléctrica en energía mecánica, les otorga una especial importancia económica especial; por lo que ningún diseñador de instalaciones y máquinas, ningún instalador ni usuario pueden ignorarlos.

Entre los diversos tipos de motores existentes, los motores asíncronos trifásicos, especialmente los de jaula, son los más utilizados en la industria, y también en los edificios terciarios en aplicaciones de cierta potencia. Además, aunque su mando y control mediante sistemas con contactores está perfectamente adaptado para una gran mayoría de aplicaciones, la utilización de componentes electrónicos, en constante evolución, amplía su campo de aplicación. Entre estas aplicaciones destacan el arranque y parada con los arrancadores-ralentizadores progresivos y una buena regulación de velocidad mediante los variadores-reguladores de velocidad.

Sin embargo, en la industria se siguen utilizando los motores asíncronos de anillos rozantes para ciertas aplicaciones de gran potencia, quedando los motores asíncronos monofásicos para las aplicaciones de pequeña potencia que se utilizan en los edificios.

En aplicaciones que requieren grandes prestaciones, especialmente con par dinámico (o de arranque o por variaciones de carga), y con necesidad de un ajuste fino y muy amplio de la velocidad, es frecuente la utilización de los motores síncronos denominados sin escobillas o de imán permanente, unidos a convertidores.

Este Cuaderno Técnico, después de presentar los diversos tipos de motores eléctricos y su principio de funcionamiento, explica con más detalle la técnica y las particularidades de utilización de los motores asíncronos, asociados a los principales dispositivos tanto de arranque como de variación de velocidad y frenado. Aporta los conocimientos básicos mínimos para entender toda la problemática asociada al control y la protección de motores.

Se aborda también brevemente el estudio de la variación de velocidad de los motores eléctricos. Este tema se trata específicamente en el Cuaderno Técnico CT 208 «Arrancadores y variadores de velocidad electrónicos». En un Cuaderno Técnico de próxima aparición se desarrolla el tema de la protección de motores.

1	Los motores asíncronos trifásicos	1.1 Principio de funcionamiento	p. 5
		1.2 Constitución	p. 7
		1.3 Los tipos diferentes de rotor	p. 8
2	Otros tipos de motores eléctricos	2.1 Motores asíncronos monofásicos	p. 11
		2.2. Los motores síncronos	p. 11
		2.3 Motores de corriente continua	p. 15
3	Utilización de los motores asíncronos	3.1 Motores de jaula	p. 18
		3.2 Motores de anillos	p. 20
		3.3 Otros sistemas de variación de velocidad	p. 21
4	Conclusión		p. 22

Los motores asíncronos trifásicos

Este capítulo está dedicado a la presentación de los motores asíncronos trifásicos, que son los más utilizados para el arrastre de las máquinas. El uso de estos motores se impone en gran número de aplicaciones debido a sus ventajas: normalizados, robustos, sencillos de mantener, fáciles de instalar y de bajo coste.

La presentación de los otros tipos de motores se desarrolla en el capítulo 2.

En el capítulo 3 se describen y comparan los principales dispositivos de arranque, regulación de velocidad y frenado que se pueden asociar a estos motores.

1.1 Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento del motor asíncrono se basa en la creación de una corriente inducida en un conductor cuando éste corta las líneas de fuerza de un campo magnético, de ahí el nombre de «motor de inducción». La acción combinada de la corriente en el inducido y el campo magnético crea una fuerza motriz en el rotor del motor.

Supongamos una espira ABCD en cortocircuito, situada en un campo magnético B, y que puede girar alrededor de un eje xy (figura 1).

Si, por ejemplo, hacemos girar el campo magnético en el sentido de las agujas del reloj, la espira queda sometida a un flujo variable y se crea en ella una fuerza electromotriz inducida que origina una corriente inducida i (ley de Faraday). Por la ley de Lenz, el sentido de la corriente es tal que se opone, mediante su acción electromagnética, a la causa que la ha creado.

Cada uno de los dos conductores queda por tanto sometido a una fuerza F de Laplace (de Lorentz, para los Anglosajones), de sentido opuesto a su desplazamiento relativo respecto al campo inductor.

La regla de los tres dedos de la mano derecha (acción del campo sobre la corriente, figura 2) permite definir fácilmente el sentido de la fuerza F aplicada a cada conductor.

El pulgar se coloca en el sentido del campo del inductor. El índice indica el sentido de la fuerza. El dedo corazón o de en medio se coloca en el sentido de la corriente inducida. Por tanto, la espira queda sometida a un par que provoca su rotación en el mismo sentido que el campo inductor, llamado campo giratorio. Por tanto también, la espira gira y el par electromotor se equilibra con el par resistente.

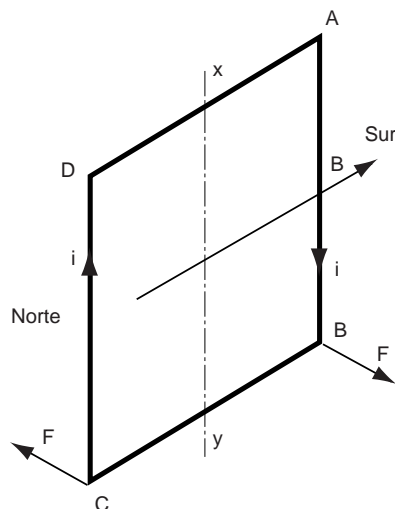


Fig. 1: Creación de una corriente inducida en una espira en cortocircuito.

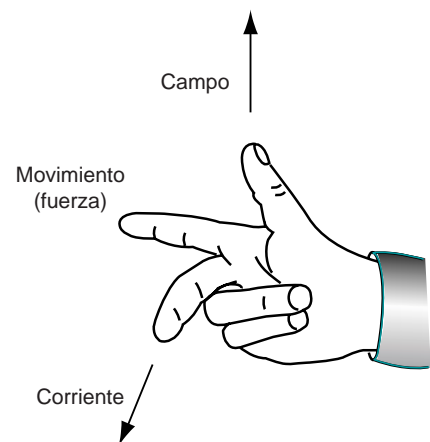


Fig. 2: Regla de los tres dedos de la mano derecha para encontrar la dirección de la fuerza.

Creación del campo giratorio

Tres arrollamientos, geoméricamente defasados 120°, se alimentan cada uno con una de las fases de la red trifásica de corriente alterna (figura 3). Los arrollamientos están recorridos por corrientes alternas que tienen también el mismo defasaje eléctrico y que producen cada una un campo magnético alterno senoidal. Este campo, siempre dirigido según el mismo eje, es máximo cuando la corriente en el arrollamiento es máxima.

El campo generado por cada arrollamiento es la resultante de dos campos que giran en sentido inverso y que tienen cada uno un valor constante que es la mitad del valor del campo máximo. En un instante dado, t1, de cualquier período (figura 4), los campos producidos por cada arrollamiento pueden representarse como sigue:

- el campo H1 disminuye. Los 2 campos que lo componen tienen tendencia a alejarse del eje OH1,
- el campo H2 aumenta. Los 2 campos que lo componen tienen tendencia a acercarse al eje OH2,
- el campo H3 aumenta. Los 2 campos que lo componen tienen tendencia a acercarse al eje OH3.

El flujo correspondiente a la fase 3 es negativo. Por tanto, el campo tiene sentido opuesto a la bobina.

Superponiendo los tres diagramas, se comprueba que:

- los tres campos que giran en sentido opuesto a las agujas del reloj, están defasados 120° y se anulan,
- los tres campos que giran en el sentido de las agujas del reloj se superponen. Estos campos se suman para formar el campo giratorio de amplitud constante $3H_{\text{máx}}/2$. Es un campo con un par de polos.

Este campo realiza una vuelta completa durante un período completo de la corriente de alimentación. Su velocidad es función de la frecuencia de la red (f), y del número de pares de polos (p). Se llama «velocidad de sincronismo».

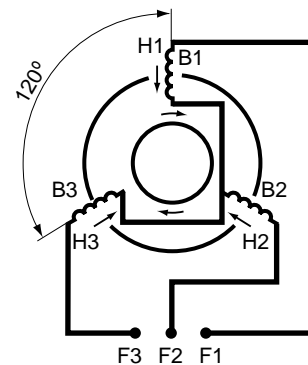


Fig. 3: Principio de funcionamiento del motor asíncrono trifásico.

Deslizamiento

No puede existir par motor si no existe corriente inducida circulando por la espira. Este par depende de la corriente que circula por la espira, y no puede existir si no existe variación de flujo en la espira. Por tanto, es necesario tener una diferencia de velocidad entre la espira y el campo giratorio. Por este motivo, el motor eléctrico que funciona según el principio que estamos describiendo se denomina «motor asíncrono». La diferencia entre la velocidad de sincronismo (Ns) y la de la espira (N) se denomina «deslizamiento» (g) y se expresa en % de la velocidad de sincronismo.

$$g = [(N_s - N) / N_s] \times 100$$

Durante el funcionamiento, la frecuencia de la corriente rotórica se obtiene multiplicando la frecuencia de alimentación por el deslizamiento. Por tanto, durante el arranque, la frecuencia de corriente rotórica es pues máxima.

El deslizamiento en régimen permanente es variable y depende de la carga del motor y del valor de la tensión de alimentación que se le aplica: es tanto menor cuanto menor es la carga, y aumenta si el motor está subalimentado.

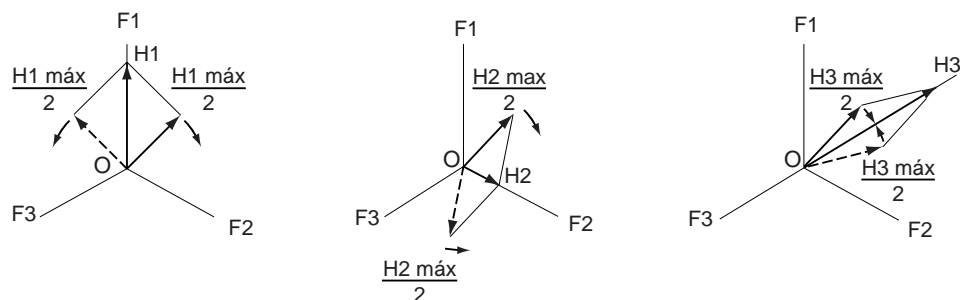


Fig. 4: Campos creados por las tres fases.

Velocidad de sincronismo

La velocidad de sincronismo de los motores asíncronos trifásicos es proporcional a la frecuencia de la corriente de alimentación e inversamente proporcional al número de pares de polos que forman el estator.

Por ejemplo:

$$N_s = 60 f/p$$

Siendo:

- N_s : velocidad de sincronismo en rpm,
- f : frecuencia en Hz,
- p : número de pares de polos.

En la tabla de la **figura 5** se indican las velocidades del campo giratorio o velocidades de sincronismo, en función del número de pares de polos, para cada una de las frecuencias industriales de 50 Hz y 60 Hz y también para la de 100 Hz.

En la práctica no siempre es posible aumentar la velocidad de un motor asíncrono alimentándolo a una frecuencia superior a la prevista, aún adaptando la tensión. En efecto, se

necesita comprobar si su diseño mecánico y eléctrico lo permiten.

Hay que indicar que debido al deslizamiento, las velocidades de rotación en carga de los motores asíncronos son ligeramente inferiores a las velocidades de sincronismo indicadas en la tabla.

Número de polos	Velocidad de rotación en rpm		
	50 Hz	60 Hz	100 Hz
2	3000	3600	6000
4	1500	1800	3000
6	1000	1200	2000
8	750	900	1500
10	600	720	1200
12	500	600	1000
16	375	540	750

Fig. 5: Velocidades de sincronismo en función del número de polos y de la frecuencia de la corriente.

1.2 Constitución

Un motor asíncrono trifásico de jaula tiene dos partes principales: un inductor o estator y un inducido o rotor.

El estator

Es la parte fija del motor. Una carcasa de acero o aleación ligera rodea una corona de chapas delgadas (del orden de 0,5 mm de grosor) de acero al silicio. Las chapas están aisladas entre sí por oxidación o mediante barnices aislantes. El laminado del circuito magnético reduce las pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault.

Las chapas tienen unas ranuras en las que se colocan los arrollamientos estatóricos destinados a producir el campo giratorio (tres arrollamientos en caso de un motor trifásico).

Cada arrollamiento está constituido por varias bobinas. La forma de conexión de estas bobinas entre sí determina el número de pares de polos del motor, y por tanto, su velocidad de rotación.

El rotor

Es el elemento móvil del motor. Igual que el circuito magnético del estator, está constituido por un apilamiento de chapas finas aisladas entre sí y forman un cilindro claveteado alrededor del árbol o eje motor. Este elemento, por su tecnología, permite distinguir dos familias de motores asíncronos: uno, cuyo rotor se denomina «de jaula», y otro, cuyo rotor, bobinado, se denomina «de anillos».

1.3 Los tipos diferentes de rotor

El rotor de jaula

Existen varios tipos de rotor de jaula, cuyo diseño puede verse en el ejemplo de la **figura 6**. Se citan estos motores empezando por los menos frecuentes:

■ Rotor de jaula resistente

El rotor resistente suele ser de jaula simple (ver más adelante la definición de motor de jaula simple). La jaula está cerrada por dos anillos resistentes (aleación especial, poca sección, anillos de acero inoxidable...).

Estos motores, a par nominal, tienen un gran deslizamiento.

Su par de arranque es elevado, y la corriente de arranque baja (**figura 7**). El rendimiento es bajo debido a las pérdidas en el rotor.

Estos motores se utilizan principalmente en aplicaciones en las que es conveniente que exista deslizamiento para variar la velocidad en función del par, por ejemplo:

□ en el caso de varios motores unidos mecánicamente entre los que debe quedar repartida la carga, como por ejemplo, los trenes de rodillos de una laminadora, o el arrastre de una grúa puente;

□ la función de enrollar-desenrollar con motores Alquist⁽¹⁾ diseñados para este fin;

□ necesidad de un gran par de arranque con una corriente de llamada limitada (polipastos o cintas transportadoras).

Puede variarse su velocidad cambiando la tensión, pero los convertidores de frecuencia van haciendo desaparecer esta aplicación. Aunque todos los motores son auto-ventilados, ciertos motores con rotor de caja resistente son moto-ventilados (motorización separada de su ventilador).

■ Rotor de jaula simple

En los huecos o muescas dispuestas a lo largo del rotor (en la periferia del cilindro constituido por la pila de láminas) se colocan conductores conectados en cada extremo a una corona metálica; estos conductores desarrollan el par motor generado por el campo giratorio. Para que el par sea homogéneo, los conductores están ligeramente inclinados respecto al eje del motor. El conjunto tiene el aspecto de una jaula de ardilla, de ahí el nombre de este tipo de rotor.

1.- Estos motores asíncronos moto-ventilados con un gran deslizamiento se utilizan para variación de velocidad; su corriente de calado es casi su corriente nominal y su característica de par-velocidad, es muy ancha. Con una alimentación variable se puede adaptar esta característica y ajustar el par motor en función de la tracción deseada.

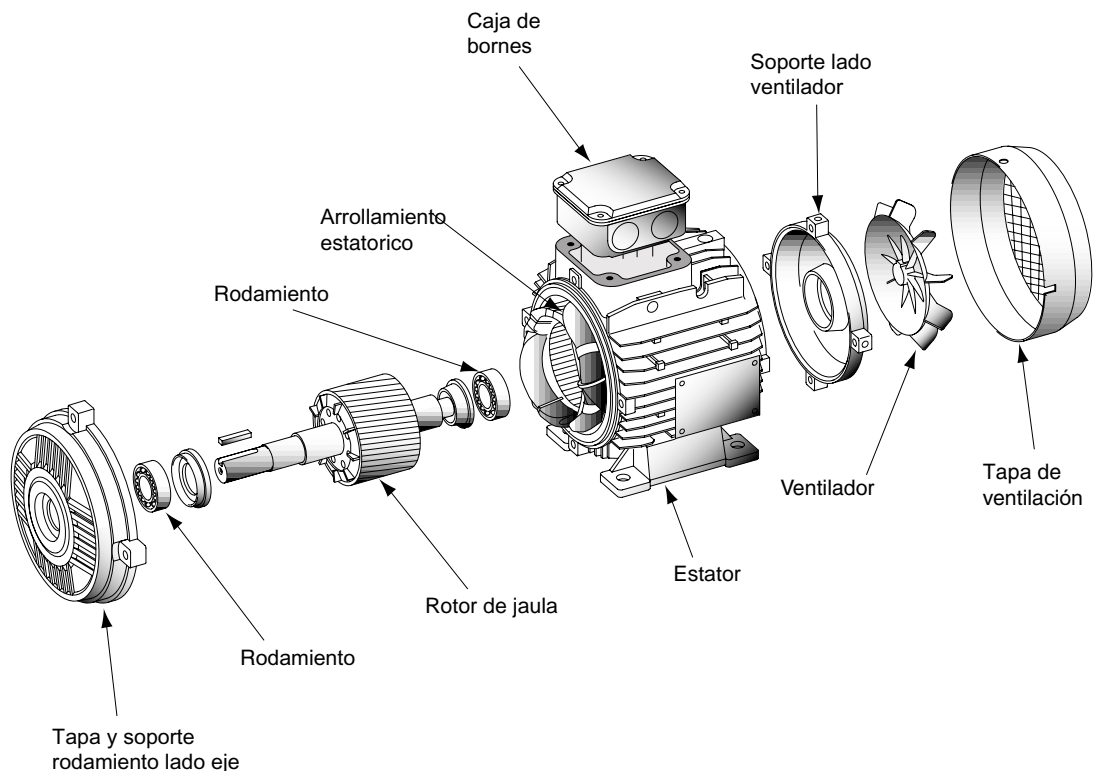


Fig. 6: Despiece de un motor de jaula.

Generalmente, la jaula de ardilla está completamente moldeada (únicamente se fabrican estas jaulas insertando los conductores en las ranuras en el caso de motores muy grandes). El aluminio se inyecta a presión, y las aletas de refrigeración, colocadas en la misma operación, aseguran el cortocircuito de los conductores del rotor.

Estos motores tienen un par de arranque relativamente bajo y la corriente de arranque es muy superior a la nominal (**figura 7**).

Por el contrario, tienen un deslizamiento muy pequeño a par nominal.

Se utilizan principalmente para grandes potencias para mejorar el rendimiento de las instalaciones con bombas y ventiladores. Se asocian también a los convertidores de frecuencia de velocidad variable, con lo que los problemas de par y de corriente de arranque quedan completamente resueltos.

■ Rotor de jaula doble

Consta de dos jaulas concéntricas, una exterior, de poca sección y gran resistencia y otra interior de mayor sección y menor resistencia.

□ Al empezar el arranque, las corrientes rotóricas son de frecuencia elevada, y, por el efecto pelicular que se produce, la totalidad de la corriente rotórica circula por la periferia del rotor y por tanto por una sección reducida de conductores. Así, al principio del arranque, siendo todavía las corrientes de frecuencia elevada, la corriente no circula más que por la

caja exterior. El par producido por la jaula exterior resistente es importante y con baja corriente de llamada (**figura 7**).

□ Al final del arranque, la frecuencia en el rotor disminuye y resulta más fácil la circulación del flujo por la jaula interior. El motor se comporta entonces aparentemente como si hubiera sido construido como una única jaula de baja resistencia. En régimen permanente, la velocidad es solamente un poco menor que la de un motor de jaula simple.

■ Rotor de ranuras profundas

Es la versión estándar.

Los conductores rotóricos se moldean en las ranuras del rotor, que tienen forma trapezoidal, con el lado menor del trapecio situado hacia el exterior del rotor.

El funcionamiento es similar al de un motor de doble jaula: la intensidad de corriente rotórica varía en función inversa de su frecuencia.

Así:

□ al principio del arranque, el par es mayor y la corriente menor,

□ en régimen permanente, la velocidad es sensiblemente igual a la de un motor de jaula simple.

Motor de rotor bobinado (rotor con anillos)

En las ranuras practicadas en la periferia del rotor se colocan unos bobinados idénticos a los del estator (**figura 8**). Generalmente el rotor es trifásico.

Un extremo de cada uno de los arrollamientos se conecta a un punto común (conexión estrella). Los extremos libres pueden conectarse o a un conector centrífugo o a tres anillos de cobre, aislados y que giran solidarios con el rotor. Sobre estos anillos frotan unas escobillas, a base de grafito, conectadas al dispositivo de arranque.

En función del valor de las resistencias insertadas en el circuito rotórico, este tipo de motor puede desarrollar un par de arranque que llega hasta 2,5 veces el par nominal.

La corriente de arranque es sensiblemente proporcional al par desarrollado en el eje del motor.

Esta solución deja paso progresivamente a los sistemas electrónicos asociados a motores de jaula estándar. En efecto, estos últimos permiten resolver los problemas de mantenimiento (sustitución de las escobillas de alimentación del rotor gastadas, y mantenimiento de las resistencias de arranque), reducir la energía disipada en las resistencias y mejorar de manera importante el rendimiento de la instalación.

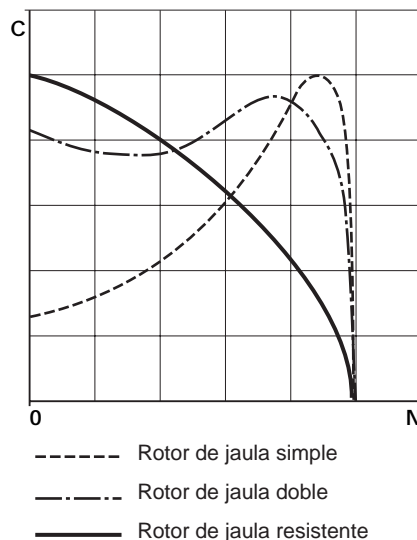


Fig. 7: Curvas par-velocidad de cada uno de los tipos de rotor de jaula.

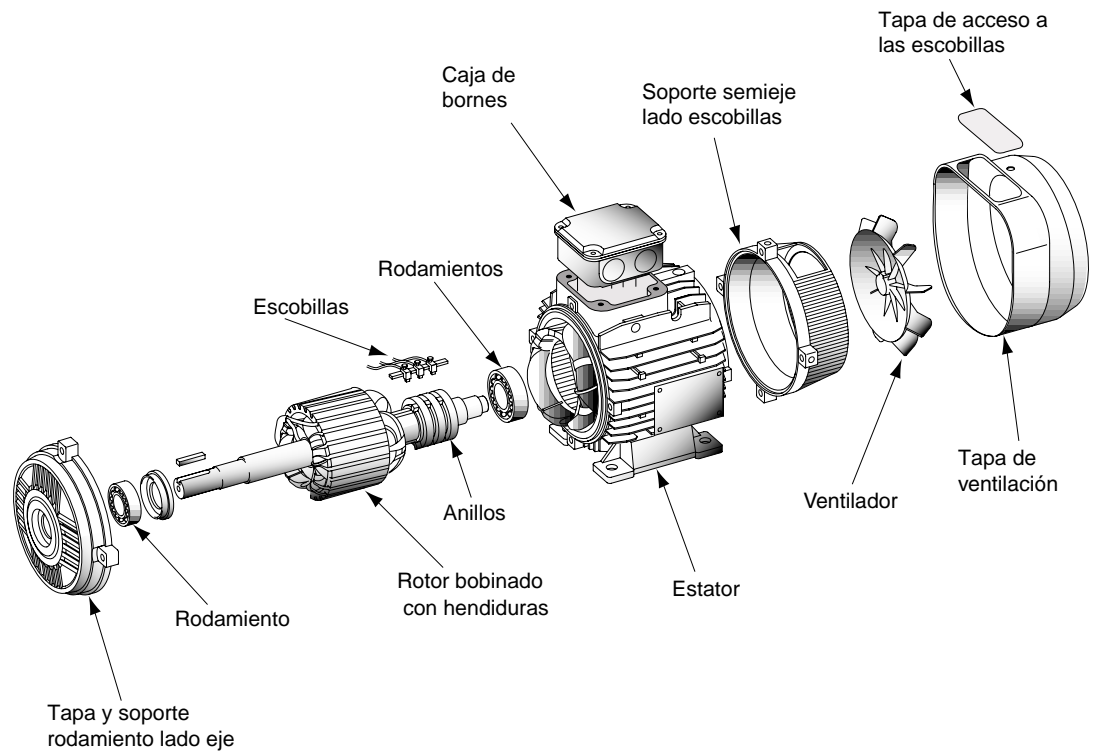


Fig. 8: Despiece de un motor de rotor con anillos.

2 Otros tipos de motores eléctricos

2.1 Motores asíncronos monofásicos

El motor asíncrono monofásico, aunque menos utilizado en la industria que su homólogo trifásico, representa sin embargo una parte muy importante de los motores utilizados para pequeñas potencias y en aplicaciones domésticas que utilizan la red monofásica de 230 V.

A igual potencia, es más voluminoso que un motor trifásico.

Por otra parte, su rendimiento y su coseno φ son mucho menores que en el caso del motor trifásico y varían considerablemente en función de la potencia y del constructor.

Los motores monofásicos hasta una decena de kW son de normal utilización en los Estados Unidos.

Constitución

El motor monofásico, como el motor trifásico, está compuesto de dos partes: el estator y el rotor.

■ El estator

Se compone de determinado número de pares de polos y sus bobinados que se conectan a la red de alimentación.

■ El rotor

Es normalmente de jaula de ardilla.

Principio de funcionamiento

Consideremos un estator que tiene dos arrollamientos conectados a la red de alimentación L1 y N (figura 9).

La corriente alterna monofásica crea en el rotor un campo magnético alterno, simple, H que es la superposición de dos campos giratorios H1 y H2 del mismo valor y de sentido contrario.

Con el motor parado y el estator alimentado, estos campos tienen el mismo deslizamiento respecto al rotor y producen por tanto dos pares iguales y opuestos. El motor no puede arrancar. Cualquier impulso mecánico en el rotor desequilibra estos deslizamientos opuestos. Uno de los pares disminuye mientras que el otro aumenta. El par resultante provoca el inicio del arranque del motor en el sentido al que ha sido empujado.

Para resolver este problema de par durante el arranque, se coloca en el estator un segundo arrollamiento defasado en 90° . Esta fase auxiliar se alimenta mediante un sistema que provoque un defasaje (condensador o bobina); una vez efectuado el arranque esta fase auxiliar puede desconectarse.

Nota: Un motor trifásico puede también utilizarse en monofásico; el condensador de arranque se conecta en serie o en paralelo con el arrollamiento no utilizado.

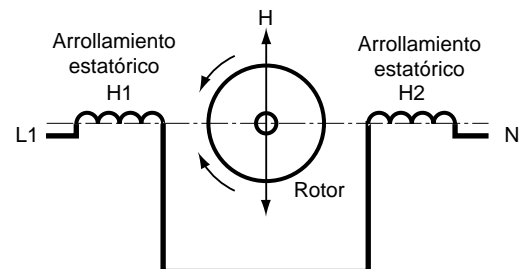


Fig. 9: Principio de funcionamiento de un motor asíncrono monofásico.

2.2. Los motores síncronos

Constitución

El motor síncrono, como el asíncrono, se compone, de un estator y de un rotor separados por un entrehierro. La diferencia consiste en que el flujo en el entrehierro no está creado por una componente de la corriente estática: lo crean o unos imanes permanentes o la corriente del inductor suministrada por una fuente de corriente continua exterior que alimenta el arrollamiento situado en el rotor.

■ El estator

El estator consta de una carcasa y un circuito magnético constituidos generalmente por unas láminas de acero al silicio y un bobinado trifásico similar al de un motor asíncrono alimentado en corriente alterna trifásica para producir el campo giratorio.

■ El rotor

El rotor tiene unos imanes o unas bobinas de excitación recorridas por una corriente continua

que crean unos polos norte y sur intercalados. El rotor, a diferencia de las máquinas asíncronas gira sin deslizamiento a la velocidad del campo giratorio.

Por tanto, existen dos tipos de motores síncronos: los motores de imán permanente y los motores de rotor bobinado.

□ En los primeros, el rotor es un imán permanente, generalmente de tierras raras (figura 10), para obtener un campo elevado en el mínimo volumen. El estator tiene arrollamientos trifásicos.

Estos motores, para efectuar aceleraciones muy rápidas, pueden absorber corrientes de sobrecarga importantes. Van siempre asociados a un variador de velocidad; estos conjuntos motor-variador se destinan a mercados específicos como el de los robots o las máquinas-herramienta para los que se necesitan motores de poco volumen, con aceleraciones importantes y una ancha banda pasante.

□ Los otros tipos de máquinas síncronas tienen el rotor bobinado, son reversibles y pueden funcionar o como generadores (alternadores) o como motores. Durante mucho tiempo estas máquinas se han utilizado como alternadores. Su uso como motores se reducía a aplicaciones específicas en las que era necesario mantener la carga a velocidad fija a pesar de variaciones relativamente importantes del par resistente. El desarrollo de los convertidores de frecuencia directos (del tipo cicloconvertidor) o indirectos, funcionando en conmutación natural gracias a la aptitud de las máquinas síncronas de proporcionar potencia reactiva, ha permitido fabricar máquinas eléctricas de velocidad variable, fiables y particularmente competitivas respecto a otras soluciones cuando la potencia sobrepasa el megavatio.

Aunque se pueden encontrar motores síncronos de utilización industrial en la gama de potencias

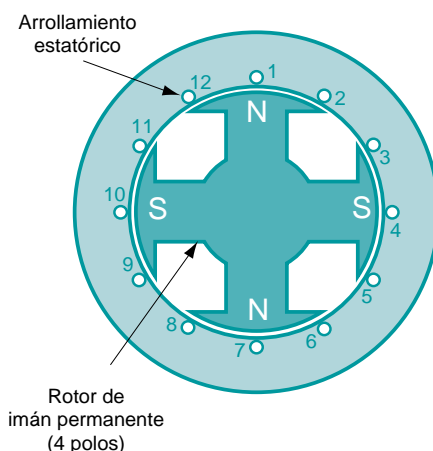


Fig. 10: Sección de un motor de imanes permanentes.

de 150 kW a 5 MW, es más allá de los 5 MW donde éstos se encuentran asociados a variadores de velocidad, puesto que es prácticamente imposible encontrar, con estas potencias, máquinas eléctricas que utilicen motores síncronos.

Características de funcionamiento

El par motor de la máquina síncrona es proporcional a su tensión en bornes; en cambio, en la máquina asíncrona es proporcional al cuadrado de esta tensión. A diferencia del motor asíncrono, puede trabajar con un factor de potencia igual o muy próximo a la unidad.

El motor síncrono, respecto al motor asíncrono, tiene algunas ventajas especiales por lo que se refiere a su alimentación mediante una red de tensión y frecuencia constantes:

- la velocidad del motor es constante, independientemente de la carga,
 - puede proporcionar potencia reactiva y permite por tanto mejorar el factor de potencia de una instalación,
 - puede soportar, sin calarse (perder velocidad de sincronismo) bajadas de tensión relativamente importantes (del orden del 50% debido a sus posibilidades de sobreexcitación).
- Sin embargo, el motor síncrono alimentado directamente por la red de distribución de energía a tensión y frecuencia constantes presenta dos inconvenientes:
- tiene dificultades de arranque; de hecho, si el motor no va asociado a un variador de velocidad, debe de efectuarse el arranque en vacío, o con arranque directo, en el caso de motores pequeños, o con la ayuda de un motor auxiliar de arranque que lo arrastra a una velocidad próxima a la de sincronismo, momento en el que se puede conectar directamente a la red,
 - se puede calar (perder la velocidad de sincronismo) si el par resistente sobrepasa al par electromagnético máximo, con lo que es necesario reiniciar todo el proceso de arranque.

Otros tipos de motores síncronos

Para terminar esta breve síntesis sobre los motores industriales, citemos los motores lineales, los motores asíncronos sincronizados y los motores paso a paso.

■ Los motores lineales

Su estructura es idéntica a la de los motores rotativos de tipo síncrono: están compuestos de un estator (plato) y de un rotor (guía de avance) desarrollados en línea. En general el plato se desplaza sobre una corredera a lo largo de la guía de avance.

Este tipo de motor se beneficia de elementos intermedios cinemáticos para la transformación del movimiento, y de ahí la ventaja mecánica del conjunto.

■ Los motores asíncronos sincronizados
Son motores de inducción. Durante la fase de arranque, el motor funciona en modo asíncrono y cuando ha alcanzado una velocidad próxima a la de sincronismo, pasa a modo síncrono.

Si su carga mecánica es importante y no puede girar en modo síncrono, pasa a modo asíncrono. Esta particularidad se obtiene mediante una construcción especial del rotor; en general son motores de poca potencia.

■ Los motores paso a paso

El motor paso a paso es un motor que gira en función de los impulsos eléctricos que alimentan sus arrollamientos. Según su alimentación puede ser del tipo:

□ unipolar, si sus arrollamientos están siempre alimentados en un mismo sentido por una única tensión, de ahí el nombre de unipolar;

□ bipolar, cuando sus arrollamientos están alimentados una vez en un sentido y otra en otro: por tanto, crean una vez un polo norte y otra un polo sur, de ahí su nombre de bipolar.

Los motores paso a paso pueden ser de reluctancia variable, con imanes permanentes o una combinación de los dos (figura 11).

El ángulo mínimo de rotación entre dos variaciones de los impulsos eléctricos se denomina paso. El motor se caracteriza por el número de pasos por vuelta (es decir, 360°). Los valores normales son 48, 100 ó 200 pasos por vuelta.

Por tanto, la rotación del motor es discontinua. Para mejorar la solución, este número de pasos puede aumentarse electrónicamente (funcionamiento en micropasos).

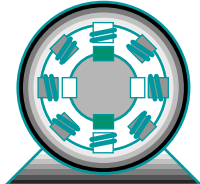

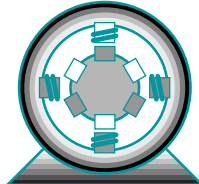
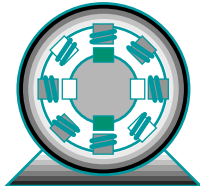
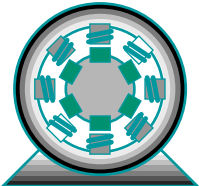
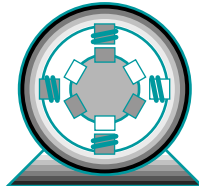
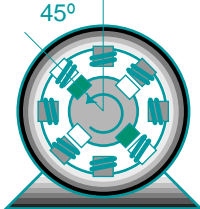
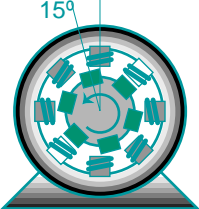
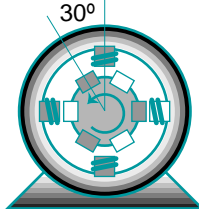
Tipo	Bipolar de imán permanente	Unipolar de reluctancia variable	Bipolar híbrido
Características	2 fases, 4 espiras	4 fases, 8 espiras	2 fases, 4 espiras
Número paso/vueltas	8	24	12
Etapas de funcionamiento			
Paso 1			
Etapas intermedia			
Paso 2			

Fig. 11: Tres tipos de motores paso a paso.

Haciendo variar la corriente en las bobinas mediante escalones, se crea un campo resultante intermedio entre un paso y otro, lo que produce una reducción efectiva del paso (figura 12). Los circuitos de micropaso multiplican hasta por 500 el número de pasos de un motor que puede pasar así, por ejemplo, de 200 a 100.000 pasos.

La circuitería electrónica permite controlar los tiempos de estos impulsos y contabilizar su número. Los motores paso a paso y su circuito de mando permiten así la rotación de un eje con gran precisión en velocidad y en amplitud.

De este modo, su funcionamiento se parece al de un motor síncrono cuando el eje está en rotación continua, lo que corresponde a determinados límites especificados de frecuencia, de par y de inercia de la carga arrastrada (figura 13). Si se sobrepasan estos límites, el motor se «desengancha», lo que produce la parada del motor.

Se puede conseguir un posicionamiento angular muy preciso sin bucle de medida. Estos motores, normalmente de potencia inferior al kW, se utilizan para pequeños modelos alimentados en baja tensión. Industrialmente, se utilizan para aplicaciones de posicionamiento tales como el ajuste de topes para corte de longitud, control de válvulas, dispositivos ópticos y de medida, carga y descarga de prensas o máquinas-herramienta, etc.

La simplicidad de esta solución (sin bucle de retorno) hace a este motor especialmente rentable. Los motores paso a paso con imanes permanentes presentan también la ventaja de tener par de parada sin alimentación. Por el contrario, la posición inicial del móvil debe de ser conocida y tenida en cuenta por la circuitería electrónica para poder asegurar un control eficaz.

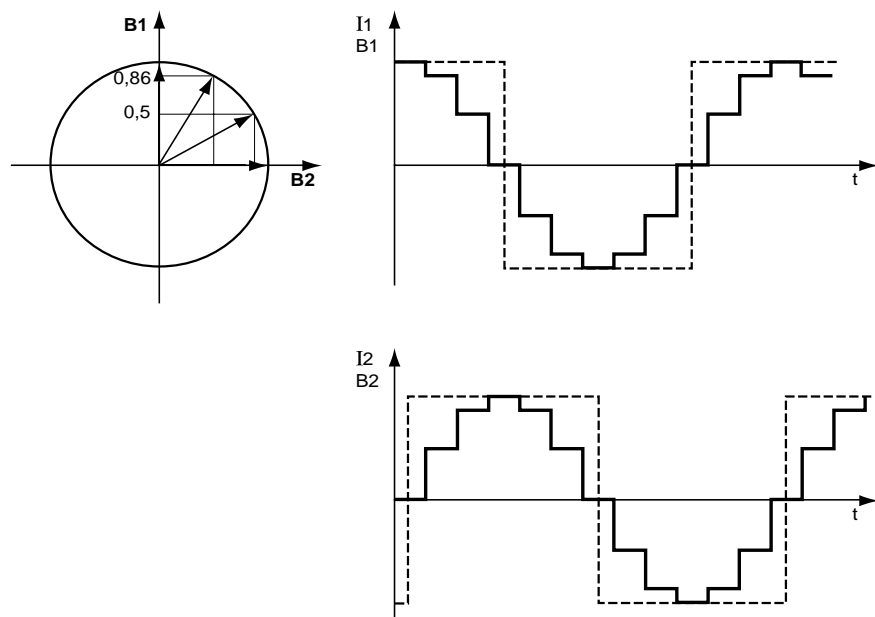


Fig. 12: Escalones de corriente aplicados a las bobinas de un motor paso a paso para reducir su paso.

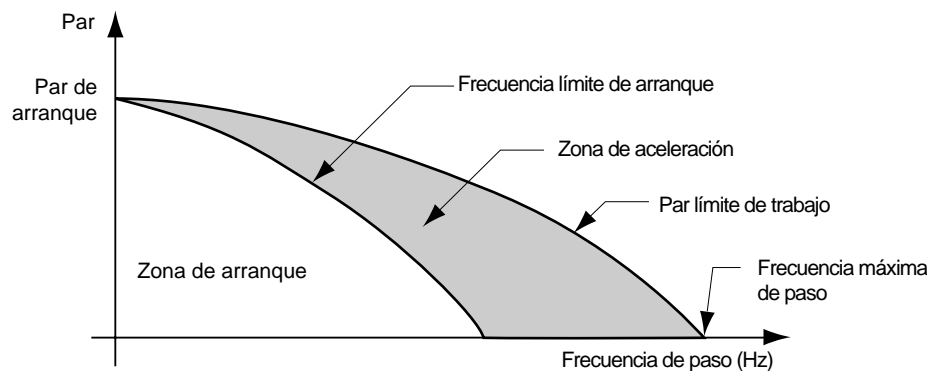


Fig. 13: Par máximo en función de la frecuencia de paso.

2.3 Motores de corriente continua

Para impulsar máquinas con velocidad variable, todavía se utilizan algunas veces motores de corriente continua con excitación independiente. Puesto que se puede reducir mucho su tamaño, se han impuesto en muy bajas potencias y con bajas tensiones. Son también muy adecuados hasta potencias importantes (varios megavatios), para la variación de velocidad con tecnologías electrónicas sencillas y poco costosas pero con prestaciones elevadas (normalmente se utilizan con un margen de variación de 1 a 100).

Sus características permiten igualmente una regulación precisa de par, como motor o como generador. Su velocidad de rotación nominal, independiente de la frecuencia de la red, es fácilmente adaptable para implementar todas las aplicaciones.

Sin embargo, son menos robustas que los motores asíncronos y mucho más caras, tanto en coste material como en mantenimiento, porque necesitan un mantenimiento regular del colector y de las escobillas.

Constitución

Un motor de corriente continua se compone de los elementos siguientes:

- El inductor o estator

Es un elemento inmóvil del circuito magnético el que se bobina un arrollamiento para producir un campo magnético. El electroimán así construido tiene una cavidad cilíndrica entre sus polos.

- El inducido o rotor

Es un cilindro de chapas magnéticas, aisladas entre sí y perpendiculares al eje del cilindro. El inducido es móvil y gira alrededor de su eje separado del inductor por un entrehierro. En su periferia, los conductores están regularmente repartidos.

- El colector y las escobillas

El colector es solidario con el inducido.

Las escobillas son fijas, y rozan en el colector, alimentando así los conductores del inducido.

Principio de funcionamiento

Cuando se alimenta el conductor, crea un campo magnético (flujo de excitación) en el entrehierro, dirigido según los radios del inducido. Este campo magnético «entra» en el inducido por el lado del polo norte del inductor y «sale» del inducido por el lado del polo sur del inductor.

Cuando se alimenta el inducido, sus conductores situados en el mismo polo del inductor (al mismo lado de las escobillas) están recorridos por corrientes del mismo sentido y quedan por tanto, según la ley de Laplace,

sometidos a una fuerza. Los conductores situados bajo el otro polo quedan sometidos a una fuerza de la misma intensidad y de sentido opuesto. Las dos fuerzas crean un par que hace girar el inducido del motor (**figura 14**).

Cuando el inducido del motor se alimenta con una tensión continua o rectificadora U , produce una fuerza contraelectromotriz E cuyo valor es:

$$E = U - RI$$

RI representa la caída de tensión óhmica en el inducido.

La fuerza contraelectromotriz E está unida a la velocidad y a la excitación por la relación:

$$E = k \omega \Phi$$

en donde

- k es una constante propia del motor,
- ω , la velocidad angular,
- Φ , el flujo.

Esta relación muestra que, con excitación constante la fuerza contraelectromotriz E , proporcional a ω , es una imagen de la velocidad.

El par queda ligado al flujo inductor y a la corriente del inducido por la expresión:

$$C = k \Phi I$$

Si el flujo disminuye, el par disminuye.

Hay dos métodos que permiten aumentar la velocidad:

- Aumentar la fuerza contraelectromotriz E , y por tanto la tensión de alimentación a excitación constante: es el funcionamiento llamado «a par constante».

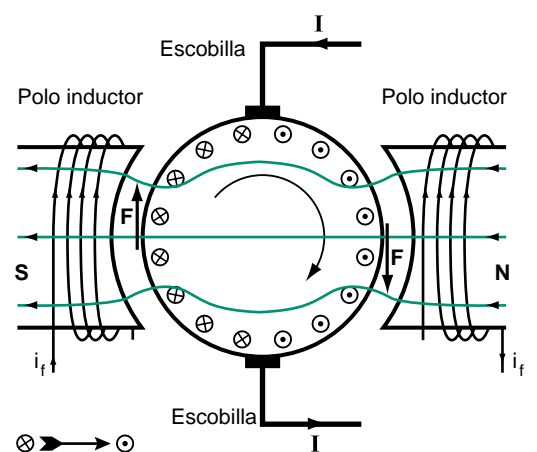


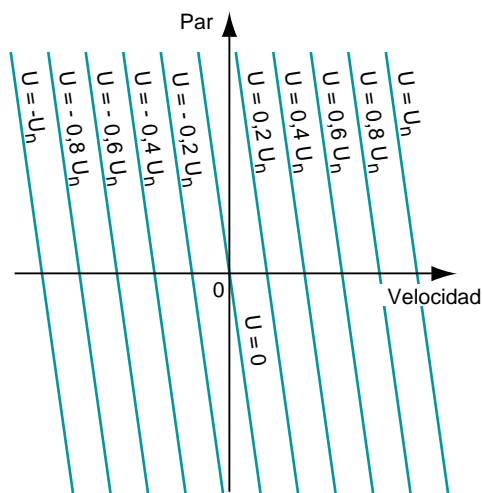
Fig. 14: Producción de par en un motor de corriente continua.

■ Disminuir el flujo de excitación, y por tanto la corriente de excitación, manteniendo constante la tensión de alimentación: es el funcionamiento llamado en régimen «con poco flujo» o «a potencia constante». Este funcionamiento hace disminuir el par al aumentar la velocidad (figura 15). Por otra parte, cuando se quiere reducir mucho el flujo se necesitan motores especialmente adaptados (mecánica y eléctricamente) para superar los problemas de conmutación.

El funcionamiento de este tipo de máquinas (motor de corriente continua) es reversible:

- si la carga se opone al movimiento de rotación (denominada carga resistente), el aparato proporciona un par y funciona el motor,
- si la carga es tal que tiende a hacer girar a la máquina (denominada carga de arrastre) o que se opone a la ralentización (fase de parada de una carga que tiene una cierta inercia), el aparato proporciona energía eléctrica y funciona como generador.

a : a par constante



b : a potencia constante

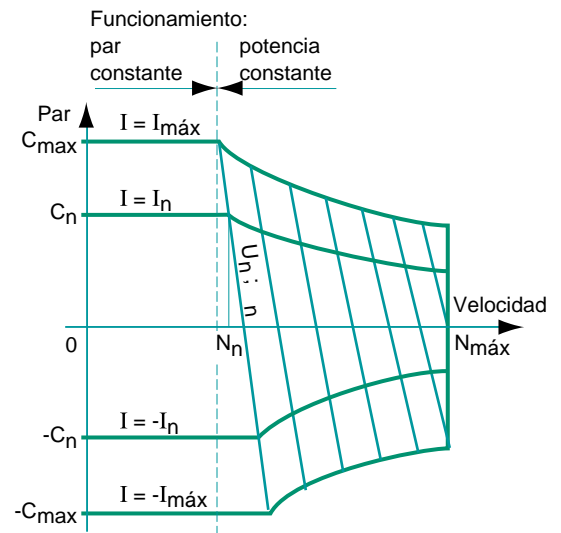


Fig. 15: Curvas par-velocidad de un motor de excitación independiente.

Distintos tipos de motores de corriente continua (figura 16)

■ Excitación paralelo (independiente o shunt)

Los arrollamientos, inducido e inductor, se conectan en paralelo o alimentados a fuentes de tensiones diferentes para adaptarse a las características de la máquina (ejemplo: tensión de inducido 400 voltios y tensión de inductor 180 voltios).

La inversión del sentido de giro se obtiene por la inversión de conexión de uno u otro arrollamiento; en general la inversión de la tensión se hace en el inducido debido a que sus constantes de tiempo son mucho menores. La mayoría de los variadores bidireccionales para motor de corriente continua trabajan de este modo.

■ Excitación serie

La construcción de este motor es similar a la del motor de excitación independiente. El bobinado inductor se conecta en serie con el bobinado inducido, de ahí su nombre.

La inversión de giro se obtiene indistintamente invirtiendo la polaridad del inducido o del inductor. Este motor se utiliza principalmente para tracción, especialmente en carretillas alimentadas mediante baterías de acumuladores. En tracción ferroviaria, los antiguos motores del TGV utilizaban este tipo de motores; los más recientes utilizan motores asíncronos.

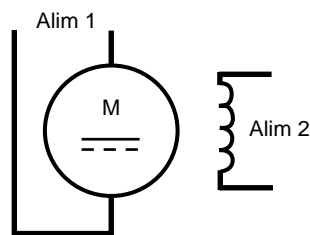
■ Excitación serie-paralelo («compound»)

Este sistema permite reunir las cualidades del motor con excitación serie y del motor con excitación paralelo.

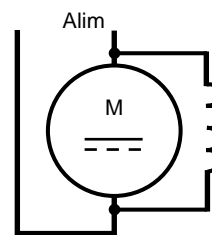
Este motor tiene dos arrollamientos en el inductor. Uno está en paralelo con el inducido y está recorrido por una corriente baja respecto a la corriente de trabajo. El otro está en serie.

Los flujos en el motor se suman si los amperios-vueltas de ambos arrollamientos tienen el mismo sentido. En caso contrario, los dos flujos se restan, pero este montaje se utiliza muy pocas veces porque lleva a un funcionamiento inestable para grandes cargas.

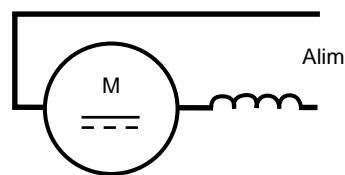
a: Motor excit. independiente



c: Motor paralelo o shunt



b: Motor serie



d: Motor compound

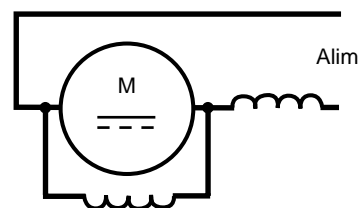


Fig. 16: Esquemas de los diferentes tipos de motores de corriente continua.

3 Utilización de los motores asíncronos

3.1 Motores de jaula

Consecuencias de una variación de tensión

■ Efecto sobre la corriente de arranque

La corriente de arranque varía en función de la tensión de alimentación. Si ésta es muy elevada durante la fase de arranque, la corriente absorbida en el instante de conexión aumenta. Este aumento de corriente se agrava por la saturación de la máquina.

■ Efecto sobre la velocidad

Cuando varía la tensión, la velocidad de sincronismo no se modifica, pero en un motor cargado, un aumento de la tensión provoca una ligera disminución del deslizamiento.

Concretamente, esta propiedad es inutilizable debido a la saturación del circuito magnético del estator; la corriente absorbida aumenta mucho y es de temer un calentamiento anormal de la máquina incluso con baja carga. Por el contrario, si la tensión de alimentación disminuye, el deslizamiento aumenta, y para poder proporcionar el par necesario, la corriente absorbida ha de aumentar, con el riesgo de calentamiento que de ello resulta. Por otra parte, como el par máximo disminuye con el cuadrado de la tensión, es posible un desenganche (calado) del motor si se produce una pérdida importante de la tensión.

Consecuencias de una variación de frecuencia

■ Efecto sobre el par

Como en toda máquina eléctrica, el par de un motor asíncrono sigue la expresión:

$$C = K I \Phi$$

(K = coeficiente constante dependiendo de la máquina)

En el esquema equivalente de la **figura 17**, el bobinado L es el que produce el flujo e I_0 es la corriente magnetizante.

En una primera aproximación, despreciando la resistencia frente a la inductancia magnetizante (es decir, para frecuencias de algunos hercios) la corriente I_0 se expresa:

$$I_0 = U / 2\pi L f;$$

el flujo tendrá la expresión:

$$\Phi = k I_0;$$

el par de la máquina será:

$$C = K k I_0 I$$

I_0 e I son las corrientes nominales para las que está dimensionado el motor.

Para no sobrepasar los límites hay que mantener I_0 en su valor nominal, lo que no puede conseguirse si la razón U/f es constante.

Por tanto, es posible obtener el par y las corrientes nominales mientras que la tensión de alimentación U puede ajustarse en función de la frecuencia.

Cuando no es posible este ajuste, la frecuencia siempre puede aumentar, pero la corriente I_0 disminuye y el par útil también, puesto que no es posible sobrepasar sistemáticamente la corriente nominal de la máquina sin riesgo de calentamiento.

Para obtener un funcionamiento a par constante, independientemente de la velocidad, hay que mantener la razón U/f constante ... que es lo que hace un convertidor de frecuencia.

■ Efecto sobre la velocidad

La velocidad de rotación de un motor asíncrono es proporcional a la frecuencia de la tensión de alimentación. Esta propiedad se utiliza normalmente para hacer funcionar a gran velocidad motores especialmente diseñados para ello, por ejemplo con una alimentación a 400 Hz (rectificadoras, aparatos de laboratorio o quirúrgicos, etc.). También es posible obtener una variación de velocidad ajustando la frecuencia, por ejemplo de 6 a 50 Hz (rodillos de cintas transportadores, aparatos de elevación, etc.).

Ajuste de velocidad de motores asíncronos trifásicos

(Estudio detallado en el Cuaderno Técnico nº 208)

Durante mucho tiempo, las posibilidades de regulación de velocidad de los motores asíncronos han sido mínimas. Los motores de jaula se utilizaban la mayor parte de veces a su velocidad nominal. En la práctica, sólo los motores con conmutación de polos o con arrollamientos estátoricos separados, todavía frecuentemente utilizados hoy en día, permitían disponer de varias velocidades fijas.

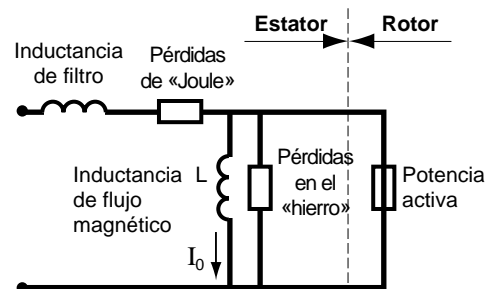


Fig. 17: Esquema equivalente de un motor asíncrono.

Actualmente, con los convertidores de frecuencia, los motores de jaula se usan normalmente con velocidad variable, y pueden así utilizarse en aplicaciones hasta ahora reservadas a los motores de corriente continua.

Motores de conmutación de polos

Como hemos visto anteriormente, la velocidad de un motor de jaula es función de la frecuencia de la red de alimentación y del número de pares de polos. Por tanto, es posible obtener un motor de dos o varias velocidades creando en el estator combinaciones de bobinados que correspondan a diferentes números de pares de polos.

Este tipo de motor sólo permite razones de velocidad de 1 a 2 (4 y 8 polos, 6 y 12 polos, etc.). Para ello hacen falta seis bornes (figura 18).

Para una de las velocidades, la red se conecta en los tres bornes correspondientes. Para la segunda, éstos se conectan entre sí, y la red se conecta en los otros tres bornes.

La mayor parte de veces, tanto en alta como en baja velocidad, el arranque se efectúa por conexión directa a la red sin ningún dispositivo especial (arranque directo).

En ciertos casos, si las condiciones de utilización lo exigen y si el motor lo permite, el dispositivo de arranque conecta primero automáticamente la velocidad baja antes que la alta o antes de la parada.

Según las corrientes absorbidas en baja velocidad y en alta velocidad, la protección puede efectuarse mediante un mismo relé térmico para las dos velocidades o con dos diferentes (uno para cada velocidad).

Generalmente, estos motores tienen un rendimiento y un factor de potencia demasiado bajos.

Motores con arrollamientos estáticos separados

Este tipo de motores, tiene dos arrollamientos estáticos eléctricamente independientes, lo que permite obtener dos velocidades con cualquier razón de proporcionalidad entre ellas. Sin embargo, sus características eléctricas se ven normalmente afectadas porque el arrollamiento de baja velocidad debe soportar los esfuerzos mecánicos y eléctricos que produce el funcionamiento del motor en alta velocidad. A veces, estos motores llegan a absorber, funcionando a baja velocidad, corrientes mayores que funcionando a alta velocidad.

También es posible fabricar motores con tres o cuatro velocidades conmutando los polos sobre uno o dos arrollamientos estáticos. Esta solución exige tomas suplementarias intermedias en los arrollamientos.

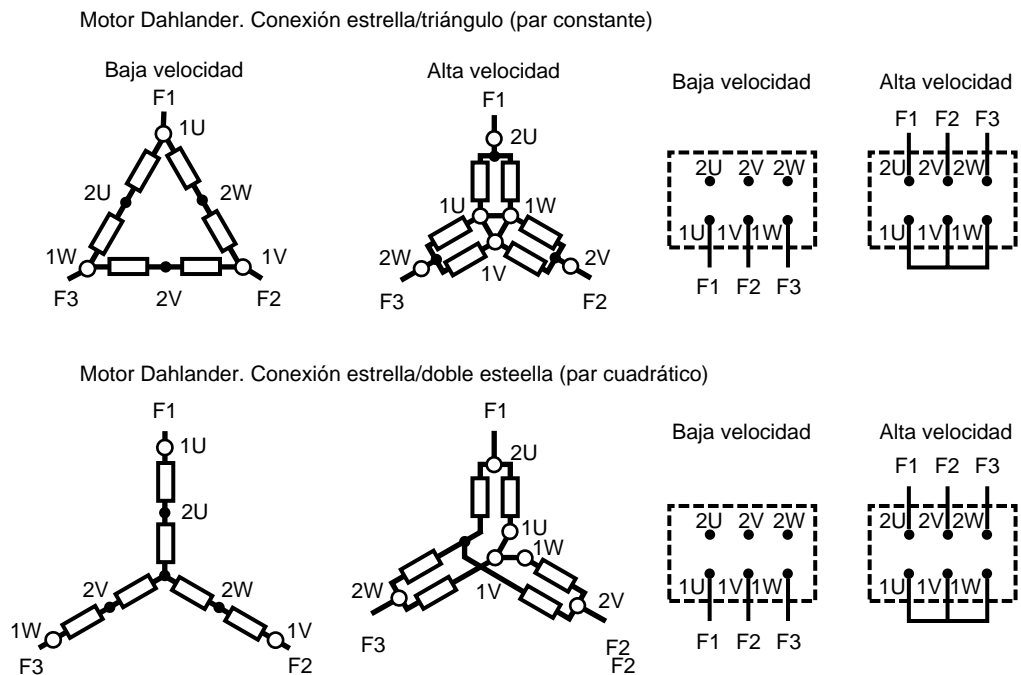


Fig. 18: Diferentes tipos de conexión Dahlander.

3.2 Motores de anillos

Utilización de la resistencia rotórica

En este tipo de motores, la resistencia rotórica permite determinar:

- su par de arranque (capítulo 1),
- y su velocidad.

En efecto, la conexión permanente de una resistencia en bornes del rotor de un motor de anillos disminuye su velocidad, y tanto más elevado sea el valor de esta resistencia. Es una solución sencilla para hacer variar su velocidad.

Ajuste de la velocidad por deslizamiento

Estas resistencias rotóricas o «de deslizamiento» pueden cortocircuitarse en varios escalones para obtener o un ajuste discontinuo de la velocidad, o una aceleración progresiva y el arranque completo del motor. Deben de poder soportar todo el tiempo de funcionamiento, sobre todo cuando se utilizan para variar la velocidad. Por esto, su volumen a veces es importante y su coste elevado.

Este sistema extremadamente simple se utiliza cada vez menos porque tiene dos inconvenientes importantes:

- durante la marcha a baja velocidad, una gran parte de la energía absorbida de la red se disipa, como pérdidas, en las resistencias,
- la velocidad obtenida no es independiente de la carga, sino que varía con el par resistente

aplicado a la máquina sobre su árbol motor (figura 19). Para una resistencia dada, el deslizamiento es proporcional al par. Así por ejemplo, la baja velocidad obtenida mediante resistencia puede ser del 50% a plena carga y sólo del 25% a media carga, mientras que la velocidad en vacío resulta prácticamente invariable.

Si un operario supervisa permanentemente la máquina, puede, modificando el valor de la resistencia según la demanda, fijar la velocidad en una cierta zona para pares relativamente importantes, pero, para pares bajos, resulta prácticamente imposible realizar cualquier ajuste. En efecto, si para obtener un punto de funcionamiento «a baja velocidad y con poco par» se inserta una gran resistencia, la mínima variación de par resistente hace pasar la velocidad de cero hasta casi el 100%. La característica es demasiado inestable.

Para las máquinas con variación especial de par resistente en función de la velocidad, el ajuste puede resultar también imposible.

Ejemplo de funcionamiento con deslizamiento: para una máquina que aplica al motor un par resistente de 0,8 Cn, pueden obtenerse velocidades diferentes representadas por el signo ● en el diagrama de la figura 19.

Con un mismo par, la velocidad disminuye cuando la resistencia rotórica aumenta.

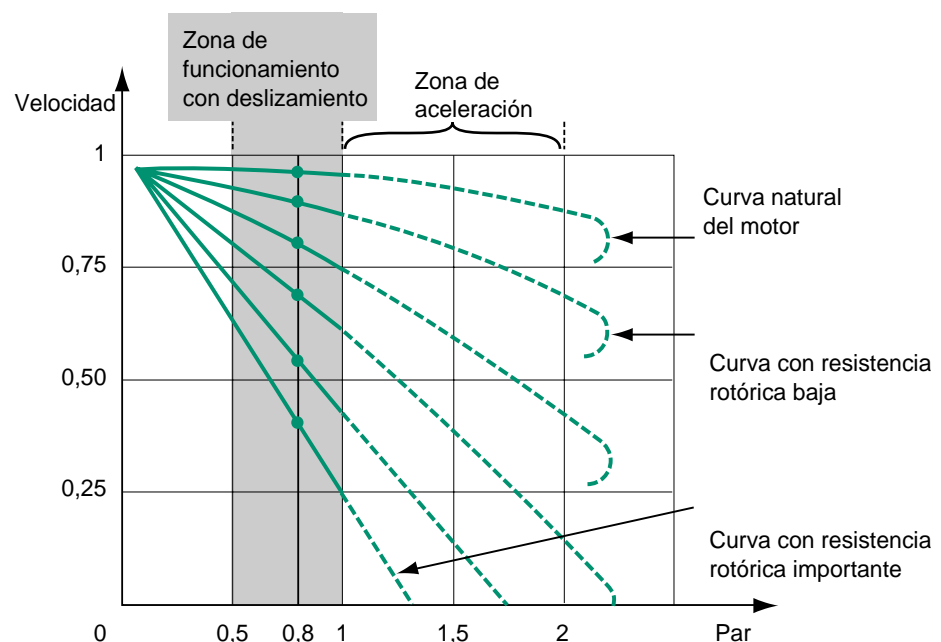


Fig. 19: Curvas velocidad-par con resistencia «de deslizamiento».

3.3 Otros sistemas de variación de velocidad

El variador de tensión

Este dispositivo no se utiliza para motores asíncronos de pequeña potencia. Necesita un motor de caja resistente.

La variación de velocidad se obtiene aumentando el deslizamiento del motor como consecuencia de la disminución de la tensión.

Su utilización está muy extendida en los sistemas de ventilación, bombas y compresores, aplicaciones en las que su característica de par disponible permite un funcionamiento satisfactorio. Los convertidores de frecuencia resultan muy competitivos, y van reemplazando progresivamente este sistema.

Otros sistemas electromecánicos

Por su importancia histórica se explican a continuación otros sistemas electromecánicos de ajuste de velocidad, ya menos frecuentes desde la generalización de los variadores de velocidad electrónicos.

■ Motores de corriente alterna con colector (Schrage)

Se trata de motores especiales. La variación de velocidad se obtiene cambiando la posición de las escobillas del colector respecto a la línea neutra.

■ Variadores de corriente de Foucault

Se compone de una campana conectada directamente al motor asíncrono que gira a velocidad constante, y de un rotor formado por un bobinado alimentado en corriente continua (figura 20).

El movimiento se transmite al árbol de salida por acoplamiento electromagnético. Variando la excitación de este bobinado, es posible ajustar el deslizamiento del conjunto. Una generatriz taquimétrica incorporada permite controlar la velocidad con una buena precisión.

Un sistema de ventilación permite evacuar las pérdidas debidas al deslizamiento.

Este principio se ha utilizado mucho en las máquinas de elevación y en especial en las grúas de canteras. Su construcción constituye un sistema robusto, sin piezas de desgaste y puede ser conveniente para funcionamientos intermitentes y para potencias de hasta un centenar de kW.

■ Grupo Ward Léonard

Este dispositivo, otrora muy extendido, está constituido por un motor y un generador de corriente continua que alimenta a su vez un motor de corriente continua (figura 21).

La variación de velocidad se consigue ajustando la excitación de la generatriz. Con una pequeña corriente de control se pueden gobernar potencias de varios centenares de kW en los cuatro cuadrantes de la gráfica par-velocidad.

Este tipo de variador ha sido utilizado en sistemas de laminación y en ascensores de minas.

Esta solución de variación de velocidad ha sido la más económica y la que mayores prestaciones ha proporcionado antes de la aparición de los semiconductores que la han convertido en obsoleta.

Variadores de velocidad mecánicos e hidráulicos

Siempre se han utilizado variadores mecánicos e hidráulicos.

Por lo que se refiere a los variadores mecánicos se han ideado todo tipo de soluciones (polea-correa, reductores de velocidad, sistemas cónicos, etc.). Estos variadores tienen la desventaja de necesitar un mantenimiento cuidadoso y se prestan difícilmente al control. Estos variadores son una competencia importante para los convertidores de frecuencia.

Los variadores hidráulicos están todavía muy extendidos en aplicaciones especiales.

Se caracterizan por su gran potencia de salida y su capacidad de desarrollar pares importantes a velocidad nula de forma continuada. En las aplicaciones industriales se pueden ver sobre todo en sistemas de servocontrol.

No entraremos en detalle sobre este tipo de variadores porque no están dentro del objetivo de este estudio.

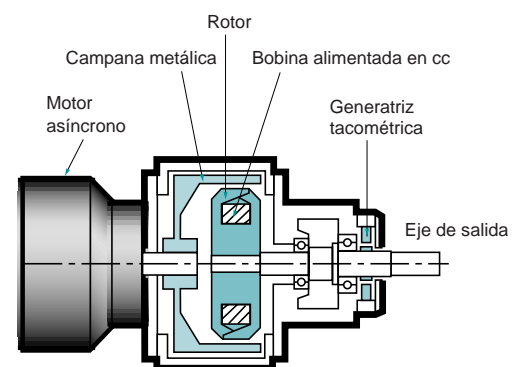


Fig. 20: Corte esquemático de un variador de velocidad de corriente de Foucault.

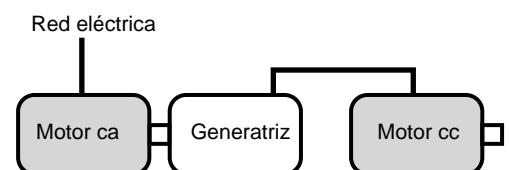


Fig. 21: Esquema de un grupo Ward Léonard.

4 Conclusión

La tabla siguiente permite visualizar muy rápidamente el conjunto de motores eléctricos disponibles, sus principales características y campos de aplicación.

Hay que destacar la situación obtenida por los motores asíncronos trifásicos de jaula en los que el calificativo de «estándar» queda actualmente reforzado por una perfecta adaptación a la utilización conseguida en el desarrollo de dispositivos electrónicos que permiten la variación de velocidad.

Tipo de motor	Asíncrono de jaula		Asíncrono con anillos	Síncrono con rotor bobinado	rotor tierras raras	Paso a paso	De corriente continua
	trifásico	monofásico					
Coste del motor	Bajo	Fácil	Elevado	Elevado	Elevado	Bajo	Elevado
Motor estanco	Estándar	Posible	Bajo demanda; caro	Bajo demanda; caro	Estándar	Estándar	Posible, muy caro
Arranque directo en la red	Cómodo	Fácil	Dispositivo de arranque especial	Imposible a partir de algunos kW	No previsto	No previsto	No previsto
Variador de velocidad	Fácil	Muy raro	Posible	Frecuente	Siempre	Siempre	Siempre
Coste de la solución con variador de velocidad	Cada vez más económico	Muy económico	Económico	Muy económico	Bastante económico	Muy económico	Muy económico
Prestaciones con variador de velocidad	Cada vez mayores	Muy bajas	Medias	Elevada	Muy elevadas	Media a elevada	Elevada a muy elevadas
Empleo	Velocidad constante o variable	Normalmente, velocidad constante	Velocidad constante o variable	Velocidad constante o variable	Velocidad variable	Velocidad variable	Velocidad variable
Utilización industrial	Universal	Para pequeñas potencias	En disminución	En las grandes potencias en MT	Máquinas herramientas, gran dinámica	Posicionamiento en bucle abierto, para pequeñas potencias	En disminución