

MÓDULO CUATRO INSTALACIONES ELÉCTRICAS
Y AUTOMATISMOS

U.D. 3 MÁQUINAS ELÉCTRICAS

M 4 / UD 3

ÍNDICE

Introducción.....	117
Objetivos	119
1. Motores de C.C.....	121
1.1. Fundamentos.....	121
1.2. Tipos	123
1.3. Principios de funcionamiento.....	125
1.4. Aplicaciones.....	125
1.5. Consideraciones finales	126
2. Motores de C.A.....	127
2.1. Fundamentos.....	128
2.2. Tipos	128
2.3. Principios de funcionamiento.....	130
2.4. Aplicaciones.....	137
3. Sistemas de arranque, inversión y regulación de máquinas eléctricas en servicio. Precauciones	138
3.1. El arranque directo en el motor de c.a.....	144
3.2. Arranque por interruptor.....	145
3.3. Arranque por contactor	146
3.4. Arrancadores compactos	147
4. Generalidades sobre los arranques parcial o totalmente controlados.....	148
4.1. Arranque estrella / triángulo	148
4.2. Arranque de motores de devanados partidos “part - winding”	151
4.3. Arranque por resistencias rotóricas / estáticas.....	153
4.4. Arranque por autotransformador	157
4.5. Arranque por arrancador estático o electrónico	160
4.6. Arranque por variador de velocidad.....	161
4.7. Otros tipos de motores	167
4.8. Consideraciones finales	172

5. Los sistemas de inversión en los motores de C.C. y C.A.	173
5.1. La inversión clásica en c.c.....	173
5.2. La inversión clásica en c.a.....	174
5.3. Arrancadores compactos	176
6. Generalidades sobre la regulación en las máquinas eléctricas (motores)	177
6.1. El arrancador electrónico.....	178
6.2. El variador de velocidad	181
6.3. Las nuevas tecnologías.....	190
Resumen	205
Bibliografía	207

INTRODUCCIÓN

Definición de máquina

Se considera máquina, a todo aquel elemento, o conjunto de elementos, capaz de convertir un efecto de una determinada naturaleza física o química, en otro de efecto distinto, o de facilitar el esfuerzo para realizarlo.

Ejemplos

El motor de explosión: Convierte la energía procedente de la combustión, normalmente de un hidrocarburo, reacción química, en energía mecánica.

La polea: Nos facilita el trabajo de, por ejemplo, elevar una carga, por un doble efecto: El primero, el actuar en el mismo sentido que la gravedad y el segundo por un efecto de división de fuerzas.

Clasificación

En función de la naturaleza de sus características las máquinas podríamos clasificarlas de muy diversas formas: Mecánicas, eléctricas, electro-mecánicas, físico-químicas, neumáticas, electro-neumáticas, etc., pero dada la naturaleza de este curso vamos a referirnos exclusivamente a las **máquinas eléctricas**.

Ejemplos

Como algún ejemplo de lo expuesto anteriormente, y teniendo en cuenta que en muchos casos coinciden en la misma máquina diversos efectos: Mecánicos, eléctricos, físico-químicos, etc., lo que hace que pueda incluirse la misma máquina en diferentes clasificaciones, podríamos citar:

Mecánicas: **La palanca, la polea, el polipasto o ternal, el engranaje, etc.**

Eléctricas: **El motor eléctrico, la dinamo, el alternador, etc.**

Físico-químicas: **La termo-dinamo, la caldera de vapor, el baño galvánico, etc.**

Neumáticas: **El émbolo, etc.**

Electro-hidráulicas: **La bomba hidráulica, etc.**

Etc.

Clasificación de las máquinas eléctricas

Una primera clasificación, la podríamos establecer en función de que la máquina en cuestión sea generadora o consumidora de energía eléctrica:

Generadores eléctricos.

Motores eléctricos.

A partir de lo expuesto anteriormente, la clasificación siguiente vendría determinada por la naturaleza de la corriente generada o consumida:

Generadores y/o motores de corriente continua (cc).

Generadores y/o motores de corriente alterna (ca).

Aun podríamos entrar en otra clasificación, derivada de las características de la generación o alimentación eléctrica:

Generadores y/o motores monofásicos.

Generadores y/o motores trifásicos.

Generadores polifásicos.

Siguiendo con el concepto de adaptar el temario del presente curso a la naturaleza del mismo y considerando las necesidades de conocimiento, y aplicación que los profesionales que lo utilicen precisarán, nos centraremos en los **motores eléctricos**.

Otra importante razón estriba en que, dentro del apartado de máquinas eléctricas, los motores forman el conjunto más importante, motivado por el gran número de unidades que se fabrican y consumen como respuesta a la gran variedad de aplicaciones posibles que la industria, e incluso el gran consumo, demanda.

OBJETIVOS

El presente curso pretende que el alumno se familiarice con las máquinas eléctricas, esencialmente con los motores, tanto los de corriente continua como los de corriente alterna.

De los motores, analizamos y estudiamos su principio de funcionamiento, sus distintas formas de arranque y frenado, los métodos de inversión de sentido de giro así como sus distintas formas de protección y aplicaciones.

Se hace especial hincapié en el motor asíncrono de rotor en cortocircuito, por su mucha mayor incidencia en la industria actual.

1. MOTORES DE C.C.

Al motor de c.c. lo podemos definir como: Máquina eléctrica rotativa, capaz de convertir la energía eléctrica de c.c. en energía mecánica.

Los motores de corriente continua se componen de los siguientes elementos:

El inductor o estator

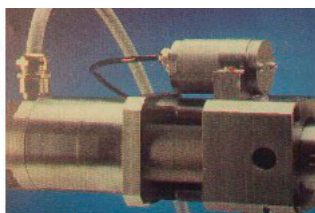
Es un elemento de circuito magnético inmóvil sobre el que se bobina un devanado para producir un campo magnético. El electroimán resultante consta de una cavidad cilíndrica entre sus polos.

El inducido o rotor

Es un cilindro de chapas magnéticas aisladas entre sí y perpendiculares al eje del cilindro, con unas ranuras paralelas al eje del motor, en las que se alojan las bobinas correspondientes. El inducido es móvil en torno a su eje y queda separado del inductor por un entrehierro.

El colector y las escobillas

El colector es solidario del inducido, las escobillas son fijas. Los conductores del inducido se alimentan por medio de este dispositivo.

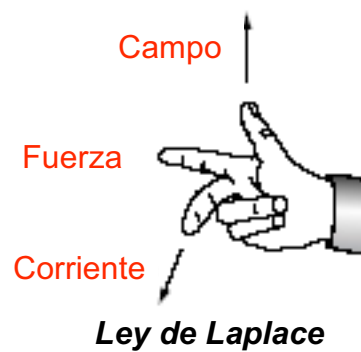


Motor de cc con eje especial y electrónica incorporada

1.1. Fundamentos

Quando se alimenta el inductor, se crea un campo magnético en el entrehierro en la dirección de los radios del inducido. El campo magnético “entra” en el inducido por el lado del polo norte del inductor y “sale” por el lado del polo sur.

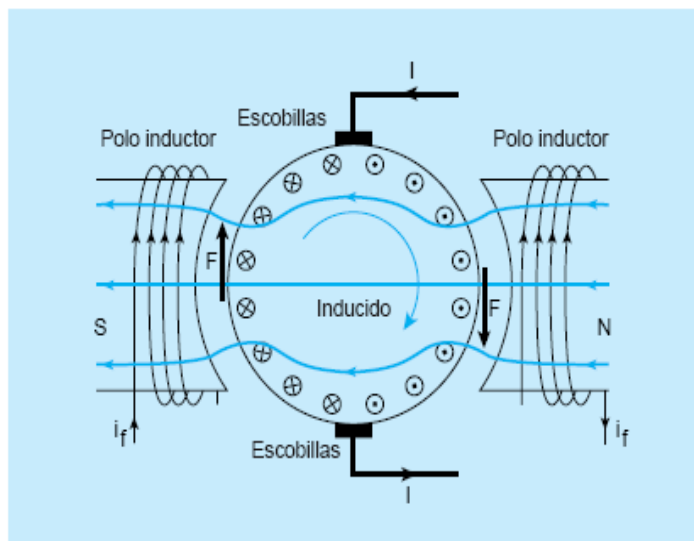
Quando se alimenta el inducido, dos corrientes del mismo sentido recorren sus conductores, situados bajo un mismo polo inductor (de un mismo lado de las escobillas). Por tanto, según la **ley de Laplace** (1), los conductores quedan sometidos a una fuerza de igual intensidad y de sentido opuesto. Ambas fuerzas crean un par que hace girar el inducido del motor.



(1) **LEY DE LAPLACE:** (Ley de la mano derecha) La fuerza total que actúa sobre un conductor de forma cualquiera, colocado en un campo magnético y recorrido por una corriente I , será el resultado de la suma de fuerzas F que el campo ejerce sobre el conductor l dado por la expresión:

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha$$

En donde: F es la fuerza que actúa sobre el conductor.
 I la intensidad que circula por él.
 l la longitud del conductor.
 B la inducción magnética.

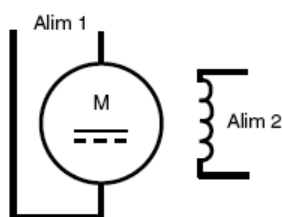


1.2. Tipos

De excitación paralela

Los bobinados inducido e inductor se conectan a circuitos independientes.

La inversión del sentido de rotación se obtiene generalmente por inversión de la tensión del inducido.

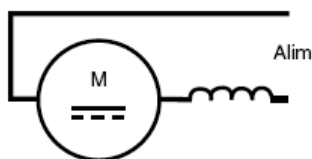


De excitación serie

La construcción de este motor es similar a la del motor de excitación separada. El bobinado inductor se conecta en serie al inducido, lo que da origen a su nombre.

La inversión del sentido de rotación se obtiene indistintamente por inversión de las polaridades del inducido o del inductor.

Estos motores se han utilizado tradicionalmente en tracción, especialmente en aquellos casos que la alimentación provenía de una batería de acumuladores, aunque actualmente están siendo sustituidos, fundamentalmente en la tracción ferroviaria, por los motores asíncronos.



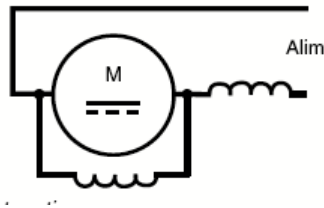
De excitación serie-paralelo (compound)

Concebido para reunir las cualidades de los motores de excitación serie y de excitación paralela.

Este motor consta de dos devanados por cada polo inductor.

Uno de ellos se conecta en paralelo con el inducido. Lo recorre una corriente débil con respecto a la corriente de trabajo. El otro se conecta en serie.

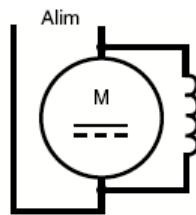
El motor es de flujo aditivo si se suman los efectos de los amperios-vuelta de ambos devanados. En caso contrario, es de flujo sustractivo, aunque esta variante no suele utilizarse debido a su funcionamiento inestable con cargas fuertes.



De excitación shunt

Los bobinados del inducido y del inductor, están alimentados por un circuito común.

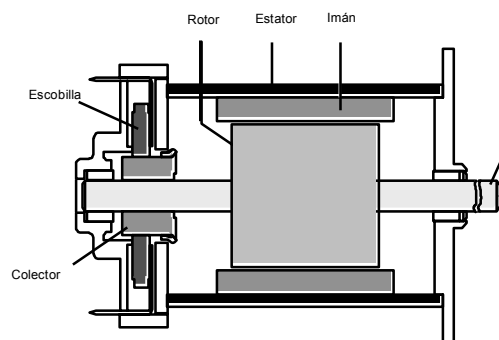
La inversión del sentido de rotación, normalmente, se obtiene por la inversión de la polaridad.



De imán permanente

Motor constituido por un rotor, al igual que los casos anteriores, bobinado, a través del que se aplica la excitación y un estator constituido por imanes permanentes.

Son motores muy utilizados en aplicaciones de pequeñas potencias.



Imán permanente

1.3. Principio de funcionamiento

Cuando se alimenta el motor a una tensión continua o rectificada U , en voltios (V,) se produce una fuerza contraelectromotriz (**fcem**) E , así mismo en V, cuyo valor es: $E = U - RI$, en donde R es el valor resistivo en ohmios (Ω) e I la intensidad en amperios (A).

RI corresponde a la caída de tensión óhmica del inducido.

La fcem E está vinculada a la velocidad (ω) en revoluciones por minuto (**rpm**) y a la excitación (ϕ) mediante la relación $E = k \omega \phi$, en la que k es una constante propia del motor. Esta relación demuestra que, a excitación constante, la fcem E , proporcional a ω , es una imagen de la velocidad.

La velocidad de un motor de corriente continua se expresa mediante la fórmula $n = k E / f$.

Para aumentar la velocidad, es necesario aumentar E , la tensión de inducido (por tanto, la tensión de alimentación), y/o disminuir el flujo de excitación (por tanto, la corriente de excitación). En las máquinas de corriente continua, el par está vinculado al flujo inductor y a la corriente del inducido. El valor del par útil es: $C = k \phi I$

Para aumentar la velocidad y mantener el par, es necesario aumentar I y, por consiguiente, la tensión de alimentación. Al reducir el flujo, el par disminuye. El funcionamiento de un motor de corriente continua es reversible:

- Si se alimenta el inducido, proporciona un par: funcionamiento de tipo motor,
- Si el inducido gira sin ser alimentado (por ejemplo, bajo el efecto de una carga arrastrante), proporciona energía eléctrica: funcionamiento de tipo generador.

1.4. Aplicaciones

Los motores de corriente continua de excitación separada siguen siendo ampliamente utilizados para accionar máquinas a velocidad variable. Muy fáciles de miniaturizar, se imponen en las potencias muy bajas.

Se adaptan igualmente bien a la variación de velocidad con tecnologías electrónicas simples y económicas, y a las aplicaciones en las que se requiere un alto rendimiento desde fracciones de kilovatio a algunos megavatios.

Sus características también permiten regular con precisión el par, tanto en modo motor como en modo generador. Su velocidad de rotación nominal puede adaptarse fácilmente, desde fabricación, a todo tipo de aplicaciones.



Ejemplo de motor de cc

Entre una muestra de los ejemplos más significativos de aplicaciones podemos contemplar los siguientes:

Recreativos / vending / sistemas de pago en máquinas.

Ofimática: Impresoras, fotocopadoras.

Actuadores de válvulas.

Expositores publicitarios.

Instrumentación laboratorio.

Filtros / robots piscinas.

Etc.

1.5. Consideraciones finales

Los motores de cc, aun siendo menos robustos que los motores asíncronos y requiriendo un mantenimiento regular del colector y de las escobillas, así como del inductor y el inducido, en el caso de potencias elevadas por tratarse de motores abiertos, siguen siendo ampliamente utilizados, aunque la tendencia es a que vayan siendo gradualmente sustituidos.

Cada vez más, sus aplicaciones se están viendo limitadas a pequeñas potencias, y a sistemas de potencias medianas de electrónicas muy simples.

2. MOTORES DE C.A.

Podríamos definir el motor de c.a. como la máquina eléctrica rotativa, capaz de transformar la energía eléctrica de c.a. en energía mecánica.

Los motores de corriente alterna se componen de los siguientes elementos:

El inductor o estator:

Es un elemento de circuito magnético inmóvil sobre el que se bobina un devanado para producir un campo magnético. El electroimán resultante consta de una cavidad cilíndrica entre sus polos.

El inducido o rotor:

Caso rotor bobinado: Es un cilindro de chapas magnéticas aisladas entre sí y perpendiculares al eje del cilindro, con unas ranuras paralelas al eje del motor, en las que se alojan las bobinas correspondientes. El inducido es móvil en torno a su eje y queda separado del inductor por un entrehierro.

En el caso citado anteriormente, deberemos considerar además:

El colector y las escobillas:

El colector es solidario del inducido, las escobillas son fijas. Los conductores del inducido se alimentan por medio de este dispositivo.

Caso rotor en corto circuito o “jaula de ardilla”: Está constituido por una serie de planchas magnéticas aisladas entre si, prensadas y alojadas en sentido perpendicular al eje del motor que alojan las varillas características que dan nombre al motor “jaula” y que pueden ser de los siguientes tipos: jaula simple, jaula doble o jaula resistente.

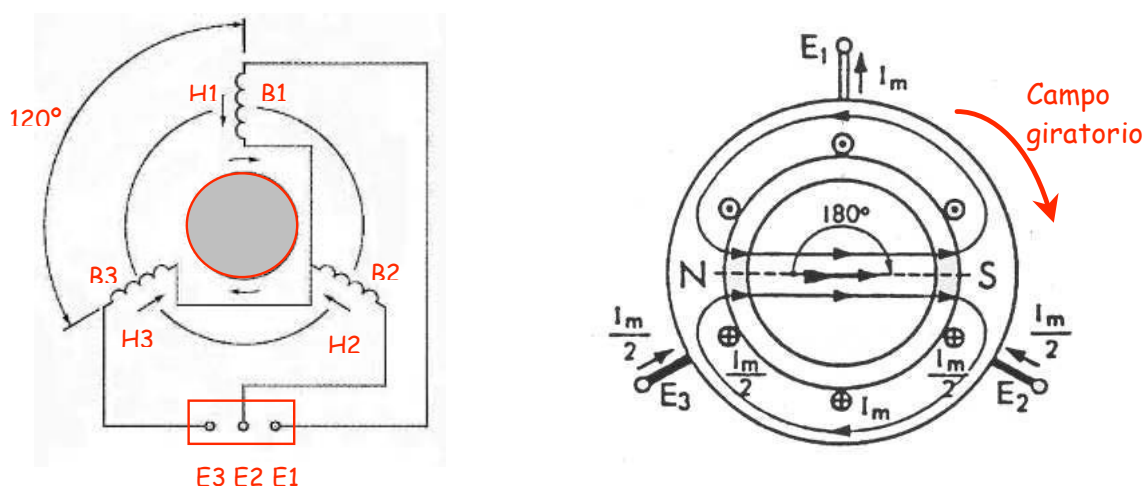
Caso rotor de imán permanente: Está constituido por imanes permanentes, normalmente de: Samario / Cobalto o Neodimio / Hierro / Boro.



Diferencias entre rotor en jaula de ardilla (A) y de imán permanente (B)

2.1. Fundamentos

El campo magnético giratorio generado en el estator del motor, induce un campo magnético en el rotor que origina el par motor que le hace girar **Ley de Lenz** (1).



Creación del campo magnético en el estator de un motor de c.a.

(1) **LEY DE LENZ:** La fuerza electromotriz inducida F tiende a oponerse a la causa que la engendra.

$$F = \frac{d\Phi}{dt}$$

En donde: $d\Phi$ es la variación experimentada en el tiempo dt por el flujo magnético que atraviesa la espira.

2.2. Tipos

Una primera clasificación de los motores de c.a., obedecería a su forma constructiva lo que origina su particular funcionamiento:

Motores asíncronos:

Su característica principal y la que le da a su vez el nombre común con el que se le conoce, es que gira ligeramente por debajo de la **velocidad de sincronismo** (2).

(2) **VELOCIDAD DE SINCRONISMO:**

$$n = \frac{f \times 60}{p} \times (1 - s) \text{ rpm}$$

En donde: **n** es la velocidad de sincronismo en revoluciones por minuto (**rpm**). **F** es la frecuencia de la red (**50 Hz**), o la suministrada por un variador de frecuencia,

P es el N° de pares de polos del motor.

Y **s** es el **deslizamiento** (3).

(3) **DESLIZAMIENTO:**

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} \times 100 (\%)$$

En donde:

$$N_s = \frac{60 \times f}{p}$$

Y **N** es la velocidad de rotación del motor en **rpm**.

Motores síncronos:

Son aquellos motores cuya velocidad es fija y proporcional a la frecuencia de la c.a. aplicada.

Otra posible clasificación podría derivarse de su conexión eléctrica:

Motores monofásicos:

Alimentados por tensiones monofásicas.

Motores trifásicos:

Alimentados por tensiones trifásicas.

Otra de las clasificaciones usuales, viene determinada por la forma constructiva del rotor, según hemos podido ver en el apartado 9.3.2:

De rotor bobinado.

De rotor en corto circuito o en jaula de ardilla.

De rotor de imanes permanentes.

Por último citaremos un motor de unas características particulares:

El motor universal:

Es un motor serie, que puede funcionar indistintamente en c.c. y en c.a.

Son motores normalmente de pequeñas potencias (menores de 1 CV). Que suelen trabajar a velocidades elevadas (hasta 10.000 rpm en vacío y hasta 3.500 rpm a plena carga).

En el caso de conexión a c.a. será conveniente que el núcleo sea laminado para evitar excesivas corrientes parásitas y las bobinas inductoras tengan un menor nº de espiras que el de c.c.



Motor de c.a.

2.3. Principios de funcionamiento

Aunque el principio de funcionamiento difiere poco entre todos los tipos citados, a excepción del motor universal, del que ya se ha mencionado su característica diferencial, **en lo sucesivo, nos estaremos refiriendo siempre, si no se hace otra mención expresa, al motor asíncrono**, dado que en la actualidad es el más utilizado, en virtud de sus características.

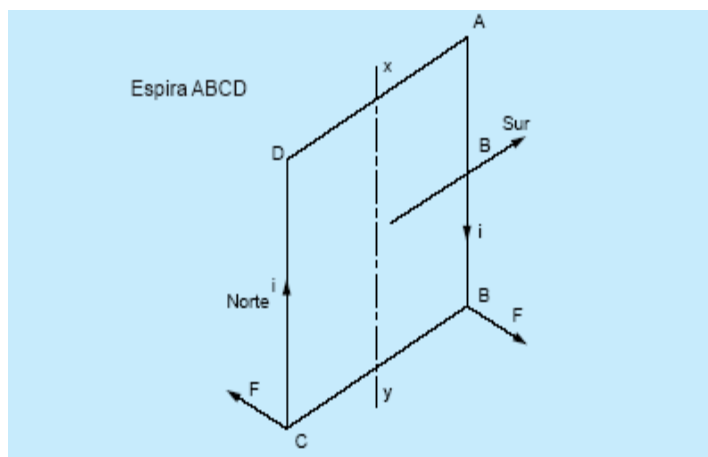
El uso de estos motores se impone en la mayoría de las aplicaciones debido a las ventajas que conllevan: robustez, sencillez de mantenimiento, facilidad de instalación, bajo coste.

Es indispensable recordar los principios de funcionamiento y de fabricación de estos motores, así como describir y comparar los principales dispositivos de arranque, regulación de velocidad y frenado que se utilizan con ellos.

El principio de funcionamiento de un motor asíncrono se basa en la creación de corriente inducida en un conductor cuando éste corta las líneas de fuerza de un campo magnético, de donde proviene el nombre “motor de inducción”.

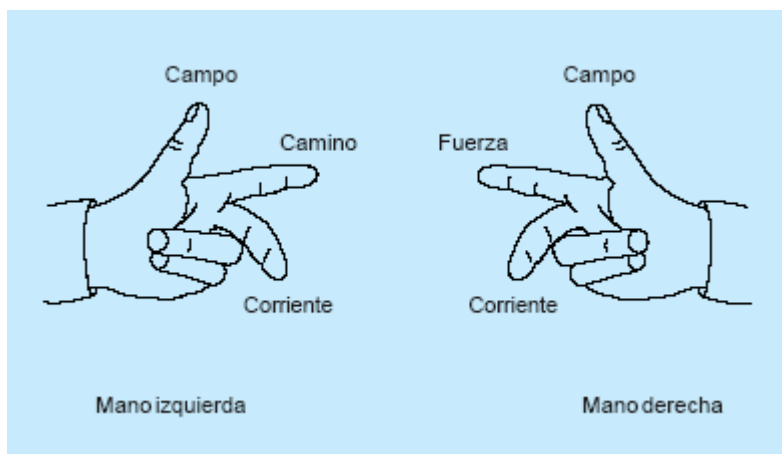
Imagine una espira **ABCD** en cortocircuito situada en un campo magnético **B** y móvil alrededor de un eje **xy**.

Si se hace girar el campo magnético en el sentido de las agujas del reloj, la espira queda sometida a un flujo variable y se convierte en el soporte de una fuerza electromotriz inducida que origina una corriente inducida i , **ley de Faraday** (4).



Creación de una corriente inducida en una espira en cortocircuito

Es posible definir el sentido de la corriente de los conductores activos **AB** y **CD** mediante la aplicación de la regla de los tres dedos de la mano izquierda. La corriente inducida circula de **A** a **B** en el conductor **AB** y de **C** a **D** en el conductor **CD**.



Reglas de los tres dedos

Según la ley de Lenz, el sentido de la corriente es tal que se opone por su acción electromagnética a su causa de origen.

Cada uno de los dos conductores se somete por tanto a una fuerza F , en sentido opuesto a su desplazamiento relativo con respecto al campo inductor.

La regla de los tres dedos de la mano derecha (acción del campo sobre una corriente) permite definir fácilmente el sentido de la fuerza F que se aplica a cada conductor. El pulgar se sitúa en el sentido del campo del inductor. El índice indica el sentido de la fuerza. El dedo del corazón se sitúa en el sentido de la corriente inducida. Por tanto, la espira se somete a un par que provoca su rotación en el mismo sentido que el campo inductor, denominado campo giratorio.

(4) **LEY DE FARADAY:** Cualquier variación del flujo magnético de un circuito, produce una fuerza electromotriz inducida (fem) proporcional a la rapidez con que varia dicho flujo:

$$fem = \frac{d\Phi}{dt}$$

- **Creación del campo giratorio:**

Tres devanados, con un decalado geométrico de 120° , se alimentan de sendas fases de una red trifásica alterna.

Los devanados reciben corrientes alternas de idéntico decalado eléctrico que producen un campo magnético alterno sinusoidal. Dicho campo, siempre dirigido en base al mismo eje, alcanza el máximo cuando la corriente del devanado es máxima.

El campo que genera cada devanado es el resultado de dos campos que giran en sentido inverso y cuyo valor constante equivale a la mitad del valor de campo máximo.

En un momento dado t_1 del período, los campos que produce cada devanado pueden representarse de la siguiente manera:

- El campo **H1** disminuye. Los 2 campos que lo componen tienden a alejarse del eje **OH1**.
- El campo **H2** aumenta. Los 2 campos que lo componen tienden a aproximarse al eje **OH2**.
- El campo **H3** aumenta. Los dos campos que lo componen tienden a aproximarse al eje **OH3**.

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

La superposición de los tres diagramas permite constatar lo siguiente:

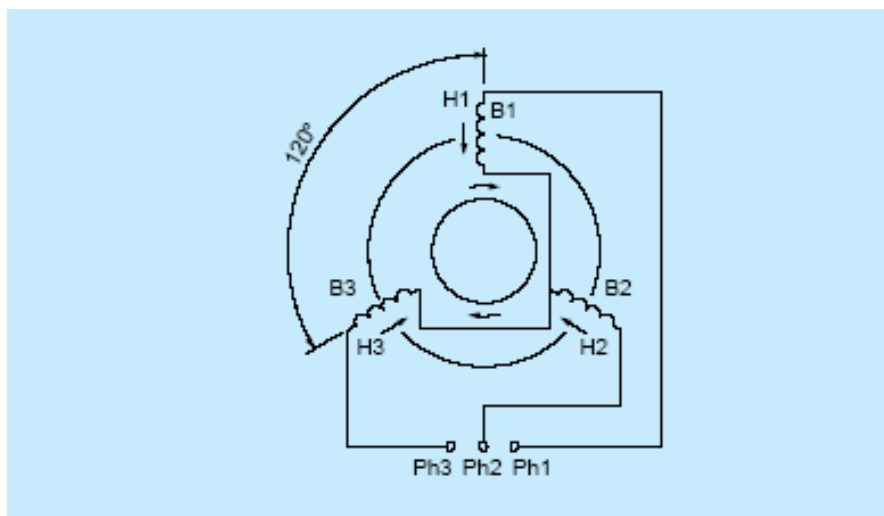
- los tres campos que giran en el sentido inverso al de las agujas del reloj están decalados de 120° y se anulan.
- los tres campos que giran en el sentido de las agujas del reloj se superponen.

Estos campos se suman y forman el campo giratorio de amplitud constante $3H_{\max}/2$ de 2 polos.

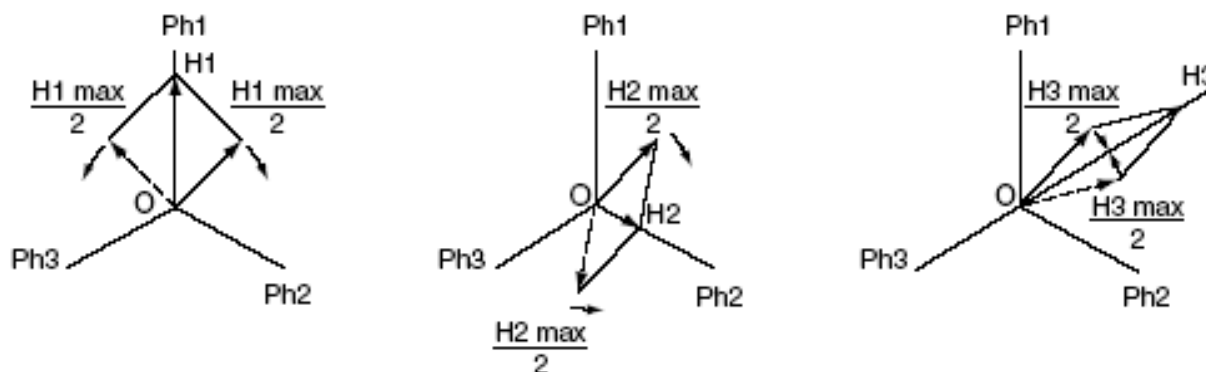
Este campo completa una vuelta por cada período de corriente de alimentación.

Su velocidad es una función de la frecuencia de la red f y del número de pares de polos p . Se denomina “velocidad de sincronización” y se obtiene mediante la fórmula ya conocida:

$$N_s = \frac{60 \times f}{p} \text{ rpm}$$



Principio de un motor asíncrono trifásico



Campos generados por las tres fases

- **Algunas consideraciones particulares referente a la constitución de los motores asíncronos:**

Un motor asíncrono trifásico consta de dos partes principales:

- Un inductor, o estator.
- Un inducido, o rotor.

- **El estator:**

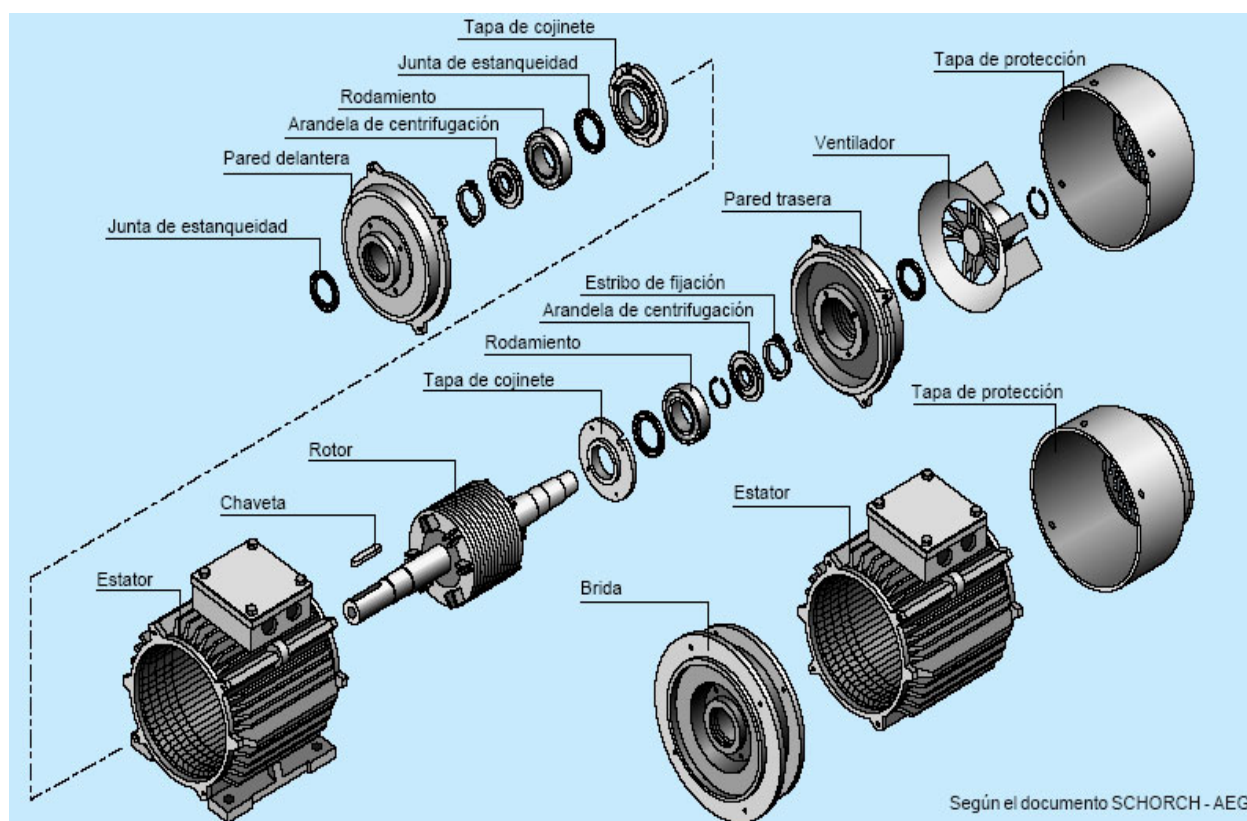
Es la parte fija del motor. Una carcasa de metal fundido o de aleación ligera encierra una corona de chapas delgadas (del orden de 0,5 mm de espesor) de acero al silicio. Las chapas quedan aisladas entre sí por oxidación o por barniz aislante.

La “foliación” del circuito magnético reduce las pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault.

Las chapas disponen de ranuras en las que se sitúan los devanados estatóricos que producen el campo giratorio (tres devanados en el caso de un motor trifásico). Cada devanado se compone de varias bobinas. El modo de acoplamiento de las bobinas entre sí determina el número de pares de polos del motor y, por tanto, la velocidad de rotación.

- **El rotor:**

Es la parte móvil del motor. Al igual que el circuito magnético del estator, se compone de un apilamiento de chapas delgadas aisladas entre sí que forman un cilindro enchavetado sobre el eje del motor.



Componentes de un motor asíncrono trifásico de jaula

Rotor de jaula

- **Rotor de jaula simple:**

Existen unos taladros o ranuras ubicados hacia el exterior del cilindro en los que se sitúan los conductores conectados a cada extremidad por medio de una corona metálica y sobre los que se aplica el par motor que genera el campo giratorio.

Los conductores se inclinan ligeramente con respecto al eje del motor para que el par sea regular. El conjunto tiene el aspecto de una jaula, lo que explica el nombre de este tipo de rotor.

En motores pequeños, la jaula está totalmente moldeada.

Normalmente, se utiliza aluminio inyectado a presión. Las aletas de refrigeración, coladas durante la misma operación, hacen masa con el rotor.

El par de arranque de estos motores es relativamente débil y la corriente que se absorbe durante la puesta bajo tensión es muy superior a la corriente nominal.

- **Rotor de doble jaula:**

Este es el tipo de rotor más utilizado.

Consta de dos jaulas concéntricas, una exterior de gran resistencia y otra interior más débil. Al iniciarse el arranque, dado que el flujo es de elevada frecuencia, las corrientes inducidas se oponen a su penetración en la jaula interior.

El par que produce la jaula exterior resistente es importante y se reduce la corriente solicitada.

Al finalizar el arranque, la frecuencia disminuye en el rotor y se facilita el paso del flujo a través de la jaula interior.

El motor pasa a comportarse como si constara de una sola jaula poco resistente.

En régimen estable, la velocidad sólo es ligeramente inferior a la del motor de jaula simple.

- **Rotor de jaula resistente:**

El rotor resistente existe principalmente en jaula simple. En general, la jaula queda cerrada por dos anillos de acero inoxidable resistente. Ciertos motores son de tipo motoventilado.

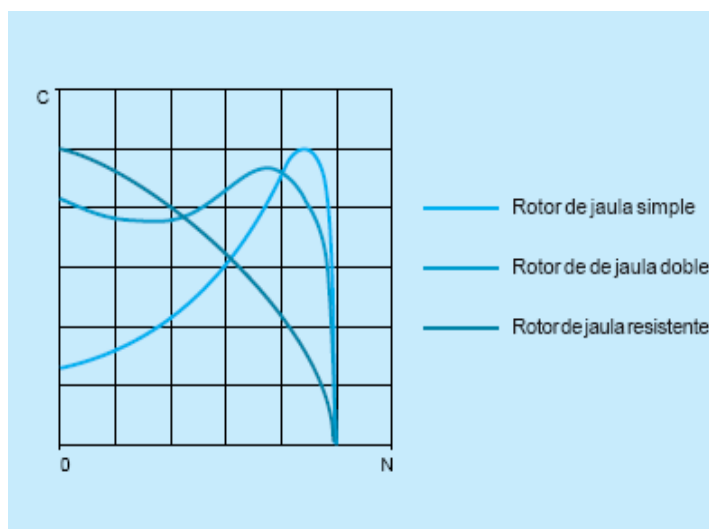
El rendimiento de los motores de jaula resistente es inferior, pero la variación de la velocidad puede obtenerse alterando únicamente la tensión. Por lo demás, su par de arranque es bueno.

- **El rotor de bobina (rotor de anillos):**

Unos devanados idénticos a los del estator se sitúan en las ranuras de la periferia del rotor, que generalmente es trifásico.

Una de las extremidades de cada uno de los devanados está unida a un punto común (acoplamiento en estrella). Las extremidades libres pueden conectarse a un acoplador centrífugo o a tres anillos de cobre aislados y solidarios del rotor.

Varias escobillas de grafito conectadas al dispositivo de arranque frotan los anillos. Dependiendo del valor de las resistencias insertadas en el circuito rotórico, este tipo de motor puede desarrollar un par de arranque que alcanza 2,5 veces el valor del par nominal. La punta de corriente durante el arranque es prácticamente igual a la del par.



Curvas de par/velocidad de los distintos rotores de jaula

2.4. Aplicaciones

Dado el importante número de aplicaciones a las que el motor de c.a. se presta, su relación resultaría prácticamente interminable.

Como pauta podemos aceptar, que cualquier aplicación que se nos presente, en la que sea necesaria la utilización de un motor, independientemente de: Su tensión de utilización, potencia, configuración mecánica, etc., siempre, o casi siempre, encontraremos un motor adecuado al caso.

A modo de simple ejemplo podríamos citar las siguientes aplicaciones:

- Pequeños electrodomésticos: Batidoras, molinillos de café lavadoras, robots de cocina, etc.
- Motores de pequeña y mediana potencia para aplicaciones industriales: Turbinas, ventiladores, bombas cintas transportadoras, etc.
- Motores de pequeña y mediana potencia para máquinas herramienta: Tornos, fresadoras, sierras circulares y de cinta, etc.
- Motores de potencias medias/altas, para grandes máquinas: Prensas, compactadoras, máquinas para grandes embalajes, etc.
- Motores para tracción eléctrica.
- Etc.

3. SISTEMAS DE ARRANQUE, INVERSIÓN Y REGULACIÓN DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS EN SERVICIO. PRECAUCIONES

Definición de arranque:

Entendemos como arranque, todas aquellas maniobras que nos conducen a la puesta en marcha, y sólo a la puesta en marcha, de un determinado proceso. Cualquier otra acción estará comprendida en una maniobra de: Inversión, regulación, control, etc.

Antes de entrar en cualquier otra consideración, deberemos tener MUY EN CUENTA, que en el proceso de arranque de un motor, deben incluirse NECESARIAMENTE, tanto por una razón obvia de protección de las personas, como la de las máquinas e instalaciones, así como por necesidades legales, los siguientes elementos:

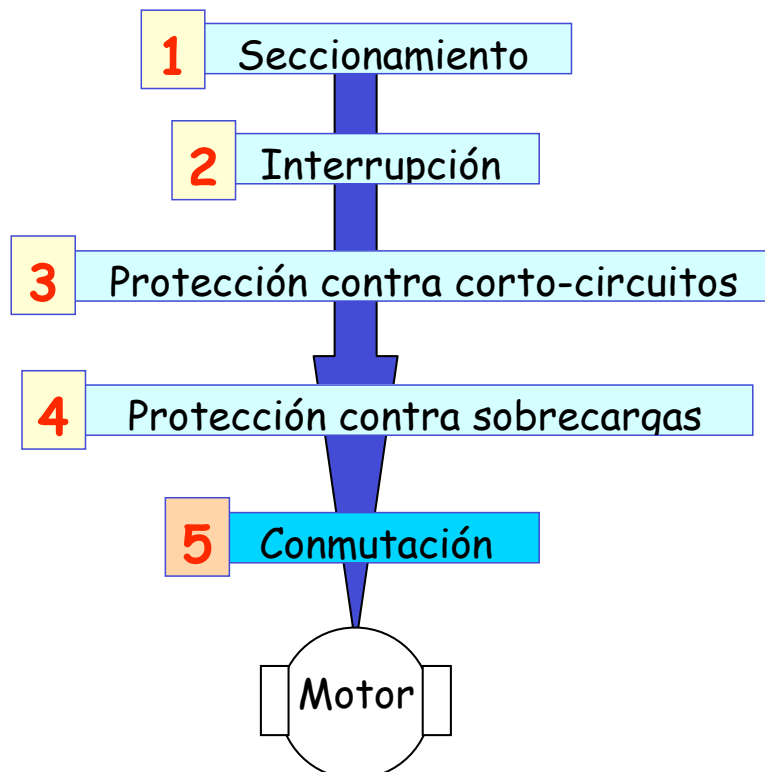


Gráfico arranque motor

De los 5 elementos mostrados en el gráfico anterior, solamente el 5º: Conmutación, podrá suprimirse, siempre y cuando, la automatización no sea necesaria.

Veamos a continuación, aunque someramente, las características y funciones que cumplen cada uno de los 5 elementos citados.

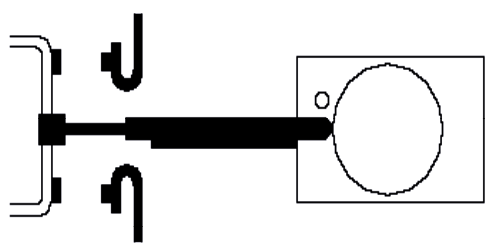
Seccionamiento

Permite de forma segura mantener el circuito sin tensión. (Norma IEC 947-3).

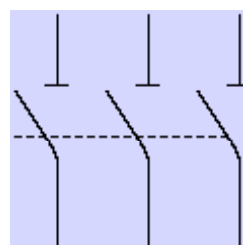
NUNCA deberá abrirse ni cerrarse el seccionador **con carga**, puesto que dicho accionamiento, no lleva sistemas de absorción de chispa y dependiendo de las intensidades que se manejen, el arco a la conexión o a la desconexión podría producir ACCIDENTES GRAVES en el operario que lo manipulara.

El seccionador deberá además cumplir con los siguientes requisitos:

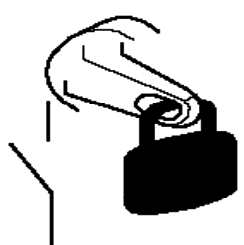
- Ser de contactos aparentes.
- Ser de conexión / desconexión omnipolar.



Contactos aparentes



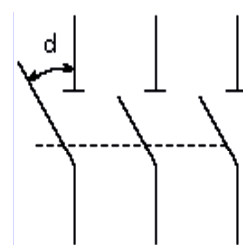
Omnipolar



Enclavable



Seccionador - fusible



Distancia aislamiento

Seccionador y sus características

De los 5 elementos mostrados en el gráfico anterior, solamente el 5º: Conmutación, podrá suprimirse, siempre y cuando, la automatización no sea necesaria.

- Ser enclavable. **No podrá enclavarse nunca el seccionador cuando esté en posición cerrada o cuando sus contactos se hayan cerrado accidentalmente.**
- Disponer de las distancias de aislamiento necesarias para impedir el cebado del arco.

Interrupción

Permite establecer, tolerar e interrumpir las corrientes de un circuito con carga.

Protección contra corto-circuitos

Protege contra las altas intensidades (del orden de los KA) producidas en un corto espacio de tiempo por un corto-circuito (contacto directo entre dos fases activas, o entre una fase y un neutro).

Por esta razón debe ser de respuesta lo más rápida posible y actúa directamente sobre el circuito de potencia al cual protege.

Suelen emplearse para estas protecciones, los fusibles o los disyuntores magnéticos.



Disyuntor magnético

Protección contra sobrecargas

Protege contra las intensidades producidas por las sobrecargas, bien sean controladas, como por ejemplo el arranque de un motor, que puede llegar a consumir hasta 7 veces su intensidad nominal durante algunos segundos (entre 3 y 7 aproximadamente, según el sistema de arranque), como incontroladas, como por ejemplo el roce excesivo de un motor por falta de engrase, por rotura de cojinete, etc.

Las protecciones contra sobrecargas suelen efectuarse mediante los dispositivos térmicos, que a diferencia del caso anterior, no actúan normalmente, excepto en el caso de muy bajas intensidades, directamente sobre el circuito de potencia, sino que mandan una señal a éste para que se desconecte.



Disyuntor magneto - térmico

Conmutación

Permite el control del arranque y parada del motor; puede ser de arranque/parada brusca (on/ off) o variable (arranque progresivo y variación de velocidad).

El elemento más habitual empleado en la conmutación es el contactor.



Contactor

Clasificación de los arranques

Existen diferentes sistemas de arranque a aplicar en motores. Una primera clasificación podría ser:

- Arranque directo.
- Arranque parcialmente controlado.
- Arranque totalmente controlado.

Cada una de las clasificaciones anteriores, que en ocasiones llevan implícita alguna otra maniobra, como la regulación y/o el control, nos permiten, a su vez, las siguientes opciones:

En el arranque directo:

- Arranque por interruptor.
- Arranque por contactor.
- Nuevas tecnologías.

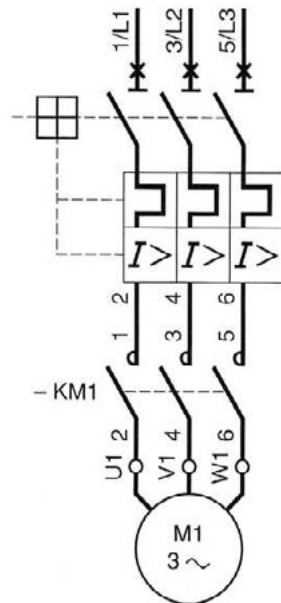
En el arranque parcialmente controlado:

- Arranque estrella / triángulo.
- Arranque de motores de devanados partidos “part-winding”.
- Arranque por resistencias rotóricas / estatóricas. - Arranque por autotransformador.

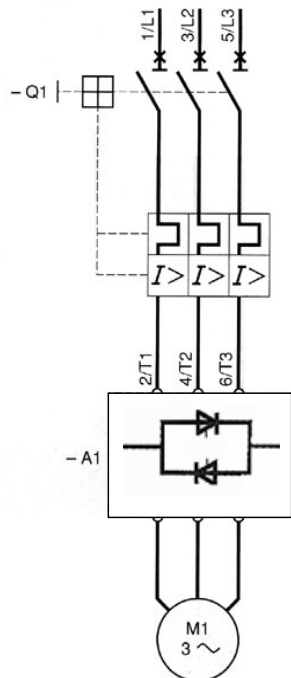
En el arranque totalmente controlado:

- Arranque por arrancador estático o electrónico.
- Arranque por variador de velocidad.
- Nuevas tecnologías.

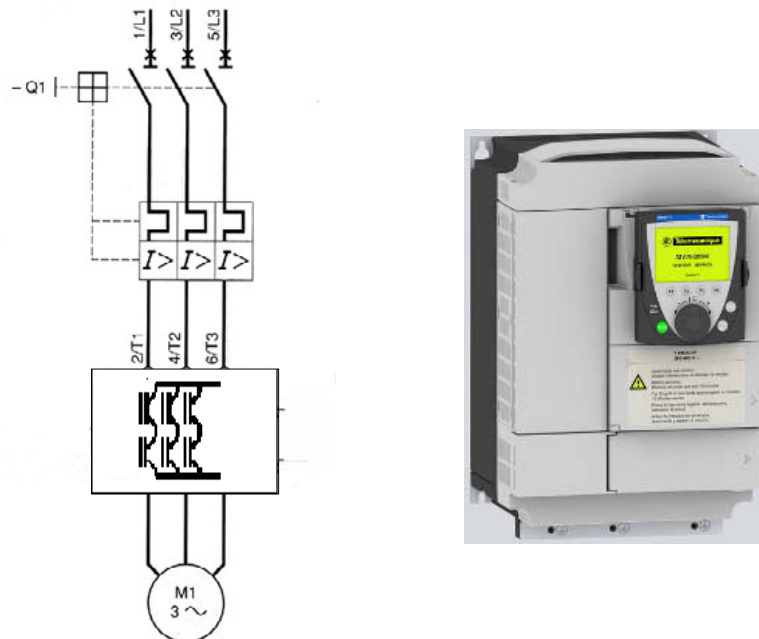
Veamos a continuación el esquema característico y una imagen de la realidad, de algunos ejemplos de los sistemas de arranque reseñados:



Arranque directo por contactor (con protección magnetotérmica)



Arranque por arrancador electrónico (con protección magnetotérmica)



Arranque con variador de velocidad (con protección magnetotérmica)

3.1. El arranque directo en el motor de c.a.

Entendemos como arranque directo de un motor, aquel proceso que inicia el funcionamiento del mismo por el simple hecho de suministrarle tensión, sin ninguna intervención sobre ésta.

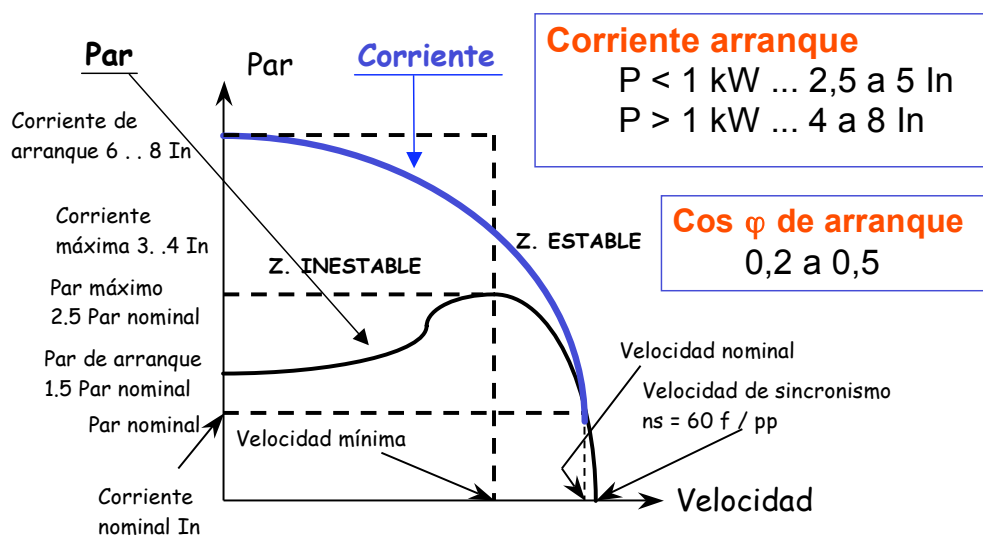


Gráfico característico de un arranque directo en un motor de c.a.

Características fundamentales:

- Par inicial de arranque: 0,6 a 1,5 M_n
- Corriente inicial de arranque: 4 a 8 I_n
- Duración media del arranque: 2 a 3 seg.

M_n = Par nominal

I_n = Intensidad nominal

Aplicaciones básicas:

- Motores de hasta 4KW.
- Máquinas pequeñas que puedan arrancar a plena carga, sin problemas mecánicos (rodamientos, correas, cadenas, etc.).
- Bombas, Ventiladores.
- Etc.

Ventajas:

- Arrancador de esquema simple.
- Coste económico.
- Par de arranque importante, en comparación con otros arranques.

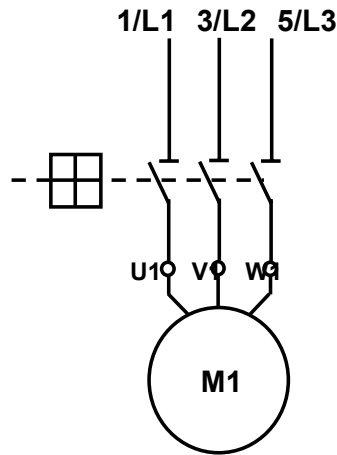
Inconvenientes:

- Punta de intensidad muy importante (la red debe admitir esta punta).
- Arranque brusco, golpe mecánico: Riesgo de roturas, mayor desgaste en rodamientos y en las transmisiones a correas o cadena.
- Parada no controlada o en rueda libre.
- Golpe de ariete. Fundamentalmente en las conducciones de fluidos por efecto de una bomba.

A continuación veremos los distintos sistemas de arranque directo empleados, tanto en motores de c.c. como de c.a.

3.2. Arranque por interruptor

Como su mismo nombre indica, es aquel en que el elemento encargado de suministrar la energía necesaria para el funcionamiento del motor, es un interruptor, que podrá ser: de palanca, rotativo, de cuchillas, etc. Éste proporciona la tensión necesaria para que el motor funcione a sus **características nominales** de: intensidad, velocidad, par, etc.



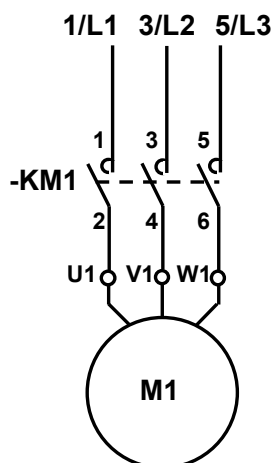
Esquema de un arranque con interruptor

3.3. Arranque por contactor

El arranque por contactor, a diferencia del anterior, nos permitirá automatizar el arranque.

En este caso, la energía al motor se la proporciona un dispositivo magneto-mecánico (contactor), en el que están perfectamente diferenciadas las etapas de potencia (energía al motor) y control (automatización).

Este último, merced al suministro de una tensión, igual o diferente de la del motor, que procedente de cualquier dispositivo: Pulsador, autómata, etc. alimenta la bobina del contactor haciendo que, cuando se produce este efecto, se cierre alimentando al motor, abriéndose y, por lo tanto, parando el motor cuando la bobina deja de estar alimentada.



Esquema de un arranque con contactor (-KM1)

En los dos casos anteriores, se ha omitido, expresamente, cualquier tipo de protección: Magnética, térmica o cualquier otra. Éstas se verán en próximos capítulos.

En los dos casos anteriores, se ha omitido, expresamente, cualquier tipo de protección: Magnética, térmica o cualquier otra. Éstas se verán en próximos capítulos.

3.4. Arrancadores compactos

Los sistemas tradicionales para arrancar un motor eléctrico, han evolucionado en los últimos tiempos, con la pretensión de conseguir diferentes efectos: Mayor fiabilidad, mejores protecciones, mejor facilidad de diseño, mayor comodidad en la instalación, menor mantenimiento, miniaturización de los sistemas, etc.

Por lo dicho anteriormente, los equipos actuales de arranque de motores, llevan normalmente integradas una buena parte de las protecciones necesarias; necesarias, tanto por la seguridad de las personas y las instalaciones, como por las exigencias de las distintas legislaciones: Municipales, autonómicas, nacionales y de la C.E.

Referente a las protecciones mencionadas, como mínimo, los nuevos sistemas integran la protección magnética: Frente a cortocircuitos, y la térmica: Frente a las sobrecargas; pudiendo además, según la tecnología del equipo, incorporar otras protecciones como: Desajuste de fases, fallo de fase, deriva a tierra, sobrecarga, subcarga, etc.

Por último diremos que estos nuevos equipos, pueden o suelen llevar integrada una pequeña pantalla en la que aparecen los datos que puede controlar, bien para programarlos, verificarlos, o tener constancia del fallo producido, caso de existir. Las más sofisticadas nos permiten, a mayor comodidad, comunicarnos con distintos elementos de la instalación: Otros equipos de arranque, autómatas, detectores, PC's, etc., mediante distintos lenguajes de comunicación: MODBUS, ASI, etc.



4. GENERALIDADES SOBRE LOS ARRANQUES PARCIAL O TOTALMENTE CONTROLADOS

Veamos a continuación los distintos sistemas de arranque total o parcialmente controlados.

Entendemos por arranque parcialmente controlado, aquel que nos permite modificar alguna de las condiciones normales que se producirían en un arranque directo.

Como caso más habitual se modifica la intensidad de arranque, consiguiéndose este efecto por una fragmentación en dos, o máximo tres, niveles de la tensión suministrada al motor durante el arranque.

El arranque controlado, es aquel en que las modificaciones de los parámetros característicos del arranque del motor, se ven modificados de forma progresiva y TOTALMENTE CONTROLADA.

4.1. Arranque estrella / triángulo

Sólo es posible utilizar este modo de arranque en motores en los que las dos extremidades de cada uno de los tres devanados estatóricos vuelvan a la placa de bornas.

Por otra parte, el bobinado debe realizarse de manera que el acoplamiento en triángulo corresponda con la tensión de la red: Por ejemplo, en el caso de una red trifásica de 380 V, es preciso utilizar un motor bobinado a 380 V en triángulo y 660 V en estrella.

El principio consiste en arrancar el motor acoplando los devanados en estrella a la tensión de la red, lo que equivale a dividir la tensión nominal del motor en estrella por $\sqrt{3}$ (en el ejemplo anterior, la tensión de la red $380\text{ V} = 660\text{ V} / \sqrt{3}$).

La punta de corriente durante el arranque es: $I_d = 1,5 \text{ a } 2,6 I_n$

El par de arranque se reduce, ya que es proporcional al cuadrado de la tensión de alimentación: $C_d = 0,2 \text{ a } 0,5 C_n$

C_d = Par de arranque

C_n = Par nominal

La velocidad del motor se estabiliza cuando se equilibran el par del motor y el par resistente, normalmente entre el 75 y 85% de la velocidad nominal. En ese momento, los devanados se acoplan en triángulo y el

motor rinde según sus características naturales. Un temporizador se encarga de controlar la transición del acoplamiento en estrella al acoplamiento en triángulo. El cierre del contactor de triángulo se produce con un retardo de 30 a 50 milisegundos tras la apertura del contactor de estrella, lo que evita un cortocircuito entre fases al no poder encontrarse ambos cerrados al mismo tiempo.

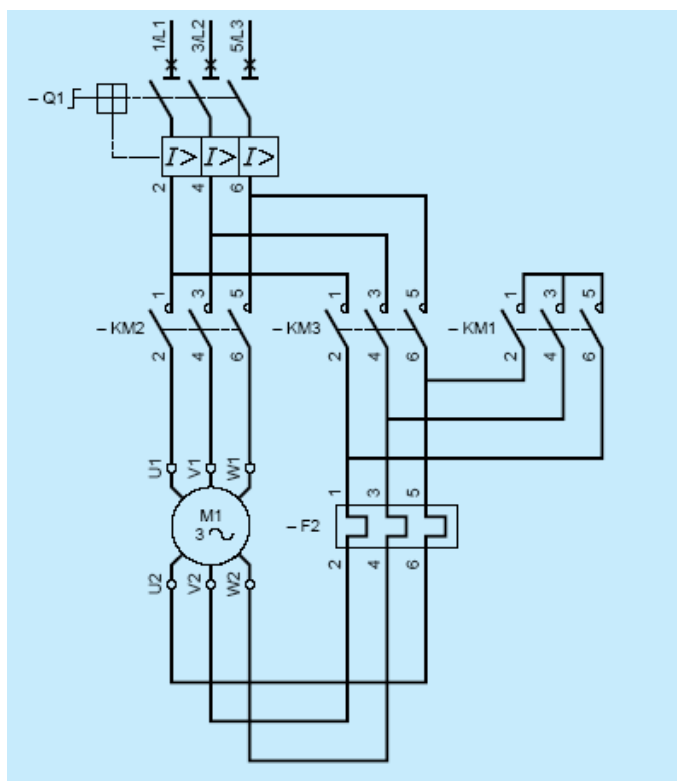
La variación de la tensión de alimentación tiene las siguientes consecuencias:

- La corriente de arranque varía proporcionalmente a la tensión de alimentación.
- El par de arranque varía proporcionalmente al cuadrado de la tensión de alimentación.

Ejemplo: Si la tensión se reduce, la corriente y el par, se reducen en la misma proporción.

La corriente que recorre los devanados se interrumpe con la apertura del contactor de estrella y se restablece con el cierre del contactor de triángulo.

El paso al acoplamiento en triángulo va acompañado de una punta de corriente transitoria, tan breve como importante, debida a la f_{cem} del motor.



Esquema del arranque estrella / triángulo

El arranque estrella-triángulo es apropiado para las máquinas cuyo par resistente es débil o que arrancan en vacío.

Dependiendo del régimen transitorio en el momento del acoplamiento en triángulo, puede ser necesario utilizar una variante que limite los fenómenos transitorios cuando se supera cierta potencia:

- Temporización de 1 a 2 segundos al paso estrella-triángulo.

Esta medida permite disminuir la f_{cem} y, por tanto, la punta de corriente transitoria.

Esta variante sólo puede utilizarse en máquinas cuya inercia sea suficiente para evitar una deceleración excesiva durante la temporización.

Características fundamentales:

- Par inicial de arranque: 0,2 a 0,5 M_n
- Corriente inicial de arranque: 1,3 a 2,6 I_n
- Duración media del arranque: 3 a 7 seg.

M_n = Par nominal

I_n = Intensidad nominal

Aplicaciones básicas:

- Máquinas de arrancado en vacío.
- Ventiladores y bombas centrífugas.
- Máquinas-herramienta.
- Máquinas para madera.
- Etc.

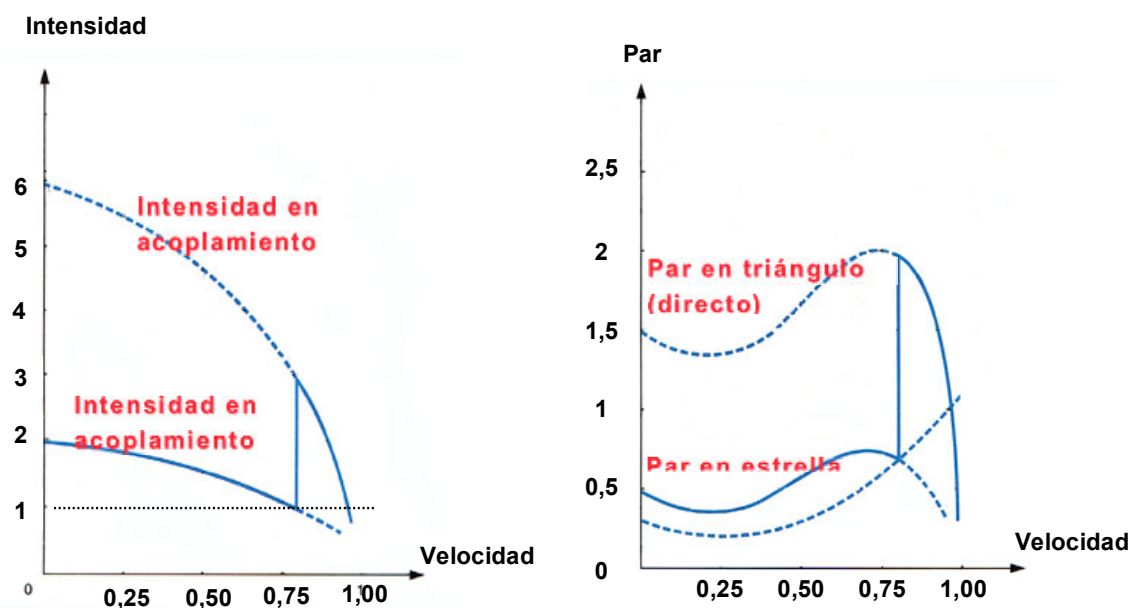
Ventajas:

- Arrancador relativamente económico.
- Buena relación par / intensidad.
- Reducción de la corriente de arranque.

Inconvenientes:

- Par pequeño en el arranque.
- Corte de alimentación en el cambio (transitorios).
- Conexión motor a 6 cables.
- No hay posibilidad de regulación.

A continuación veremos los distintos sistemas de arranque directo empleados, en motores de c.a.



Curvas características del arranque estrella - triángulo

- **Arranque en 3 tiempos: estrella-triángulo + resistencia-triángulo.**

El corte se mantiene, pero la resistencia se pone en serie aproximadamente durante tres segundos con los devanados acoplados en triángulo. Esta medida reduce la punta de corriente transitoria.

- **Arranque en estrella-triángulo + resistencia-triángulo sin corte.**

La resistencia se pone en serie con los devanados inmediatamente antes de la apertura del contactor de estrella. Esta medida evita cualquier corte de corriente y, por tanto, la aparición de fenómenos transitorios.

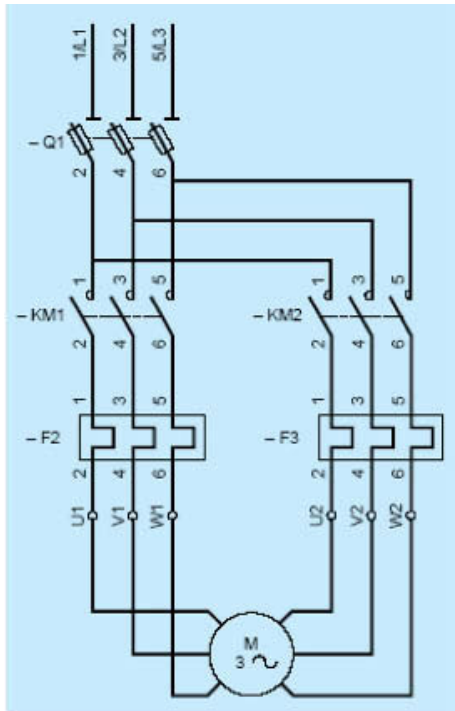
El uso de estas variantes conlleva la instalación de componentes adicionales y el consiguiente aumento del coste total. En muchos casos, el uso de un arrancador estático es una solución preferible.

4.2. Arranque de motores de devanados partidos “part - winding”

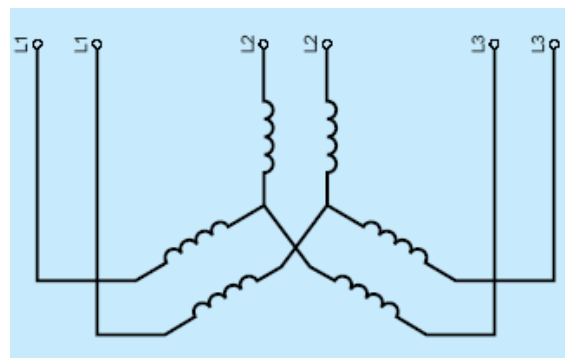
Este tipo de motor está dotado de un devanado estatórico desdoblado en dos devanados paralelos con seis o doce bornas de salida. Equivale a dos “medios motores” de igual potencia.

Durante el arranque, un solo “medio motor” se acopla en directo a plena tensión a la red, lo que divide aproximadamente por dos tanto la corriente

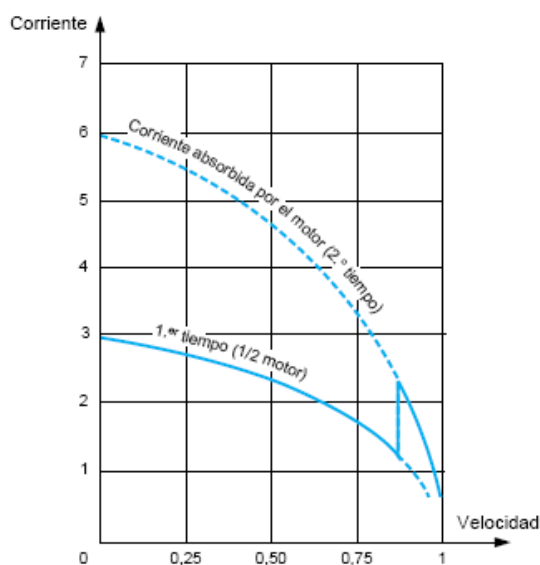
de arranque como el par. No obstante, el par es superior al que proporcionaría el arranque estrella-triángulo de un motor de jaula de igual potencia.



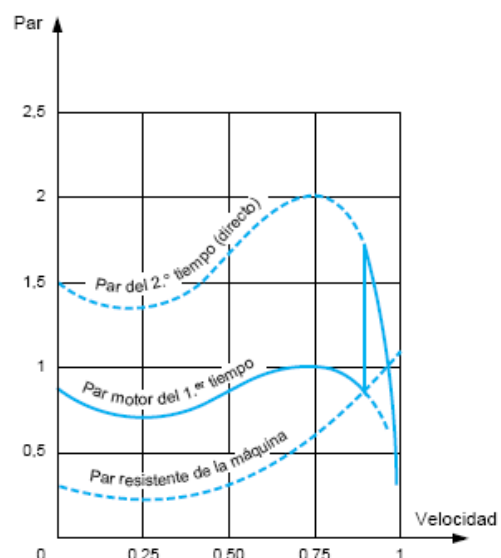
Al finalizar el arranque, el segundo devanado se acopla a la red. En ese momento, la punta de corriente es débil y de corta duración, ya que el motor no se ha separado de la red de alimentación y su deslizamiento ha pasado a ser débil. Este sistema, poco utilizado en Europa, es muy frecuente en el mercado norteamericano (tensión de 230/460 V, relación igual a 2).



Arranque de un motor de devanados partidos (“part-winding”)



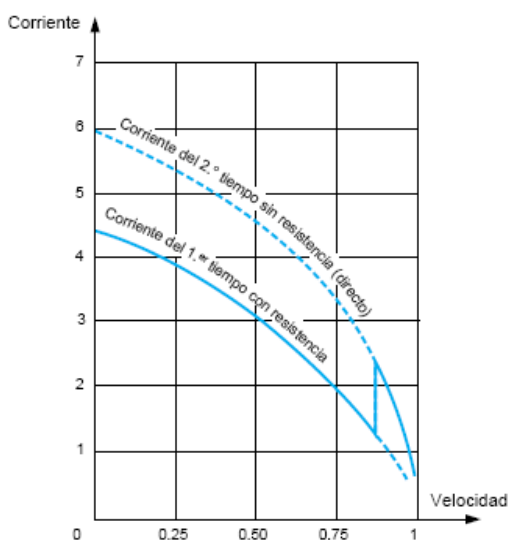
Curva de corriente / velocidad del Arranque de un motor “part-winding”



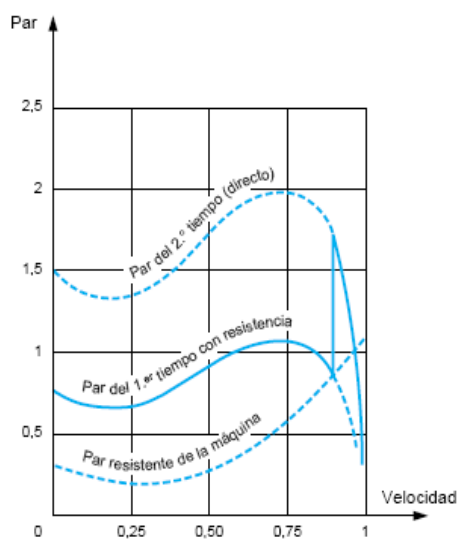
Curva de par / velocidad del arranque de un motor “part-winding”

4.3. Arranque por resistencias rotóricas / estatóricas

Arranque por resistencias estatóricas:



**Curva de corriente / velocidad
en arranque estatórico**



**Curva de par / velocidad
en arranque estatórico**

El principio consiste en arrancar el motor bajo tensión reducida mediante la inserción de resistencias en serie con los devanados.

Una vez estabilizada la velocidad, las resistencias se eliminan y el motor se acopla directamente a la red. Normalmente, se utiliza un temporizador para controlar la operación.

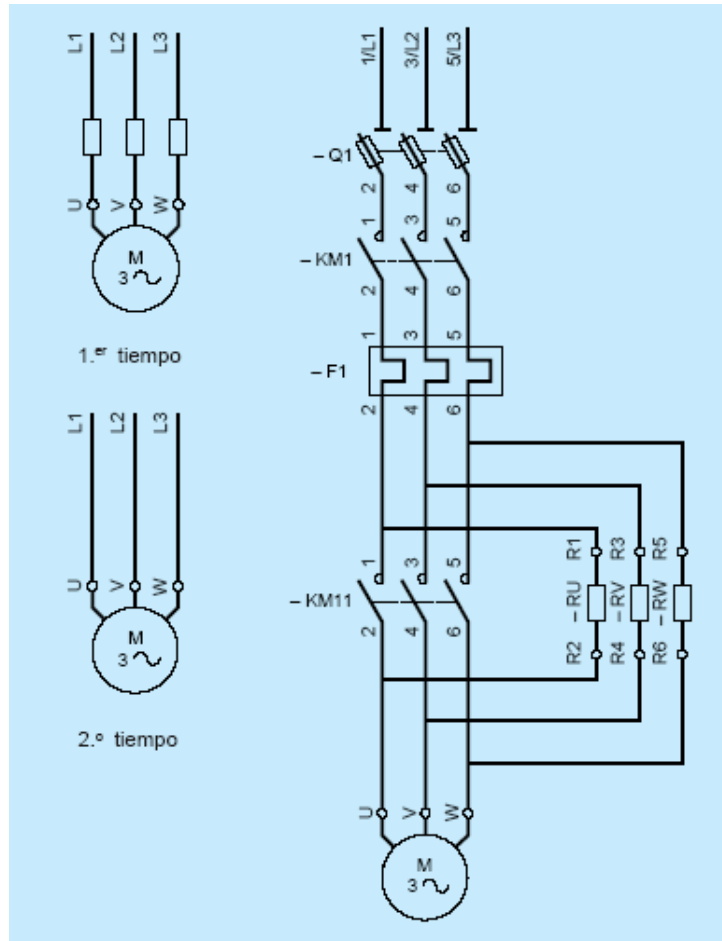
El principio consiste en arrancar el motor bajo tensión reducida mediante la inserción de resistencias en serie con los devanados.

Una vez estabilizada la velocidad, las resistencias se eliminan y el motor se acopla directamente a la red. Normalmente, se utiliza un temporizador para controlar la operación.

Durante este tipo de arranque, el acoplamiento de los devanados del motor no se modifica. Por tanto, no es necesario que las dos extremidades de cada devanado sobresalgan de la placa de bornas.

El valor de la resistencia se calcula en base a la punta de corriente que no se debe superar durante el arranque, o al valor mínimo del par de arranque necesario teniendo en cuenta el par resistente de la máquina accionada.

Generalmente, los valores de corriente y de par de arranque son:



Arranque por resistencias estáticas

$$I_d = 4,5 I_n$$

$$C_d = 0,75 C_n$$

Durante la fase de aceleración con las resistencias, la tensión que se aplica a las bornas del motor no es constante. Equivale a la tensión de la red menos la caída de tensión que tiene lugar en la resistencia de arranque.

La caída de tensión es proporcional a la corriente absorbida por el motor. Dado que la corriente disminuye a medida que se acelera el motor, sucede lo mismo con la caída de tensión de la resistencia. Por tanto, la tensión que se aplica a las bornas del motor es mínima en el momento del arranque y aumenta progresivamente.

Dado que el par es proporcional al cuadrado de la tensión de las bornas del motor, aumenta más rápidamente que en el caso del arranque estrella-

triángulo, en el que la tensión permanece invariable mientras dura el acoplamiento en estrella.

Este tipo de arranque es, por tanto, apropiado para las máquinas cuyo par resistente crece con la velocidad, por ejemplo los ventiladores.

Su inconveniente consiste en que la punta de corriente es relativamente importante durante el arranque. Sería posible reducirla mediante el aumento del valor de la resistencia, pero esta medida conllevaría una caída de tensión adicional en las bornas del motor y, por tanto, una considerable reducción del par de arranque.

Por el contrario, la eliminación de la resistencia al finalizar el arranque se lleva a cabo sin interrumpir la alimentación del motor y, por tanto, sin fenómenos transitorios.

Características fundamentales:

- Corriente inicial de arranque: $4,5 I_n$
- Par inicial de arranque: $0,6$ a $0,85 M_n$
- Duración media del arranque: 7 a 12 seg.

M_n = Par nominal

I_n = Intensidad nominal

Aplicaciones básicas:

- Máquinas de fuerte inercia sin problemas particulares de par ni de intensidad en el arranque:
- Turbinas.
- Centrifugadores.
- Máquinas de elevación.
- Etc.

Ventajas:

- Posibilidad de ajuste de los valores de arranque.
- No hay corte de la alimentación durante el arranque.
- Importante reducción de las puntas de corriente transitorias.

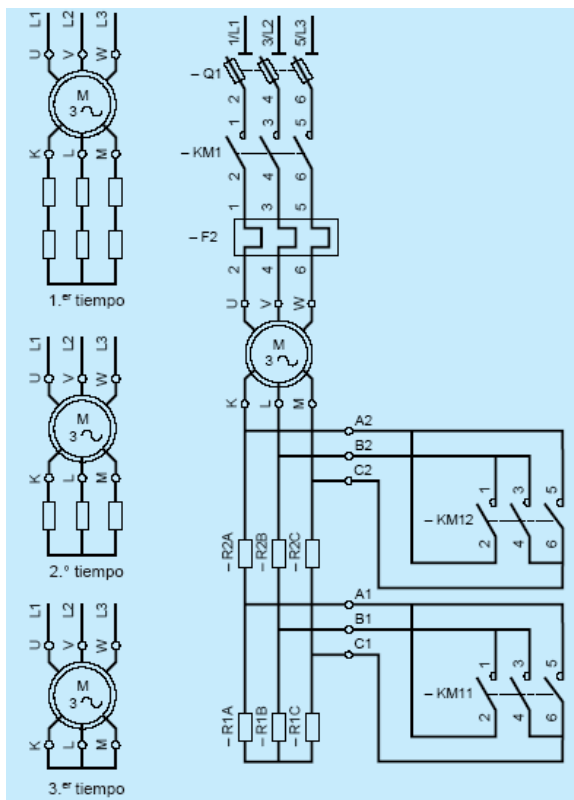
Inconvenientes:

- Pequeña reducción de la punta de arranque.
- Necesita resistencias.

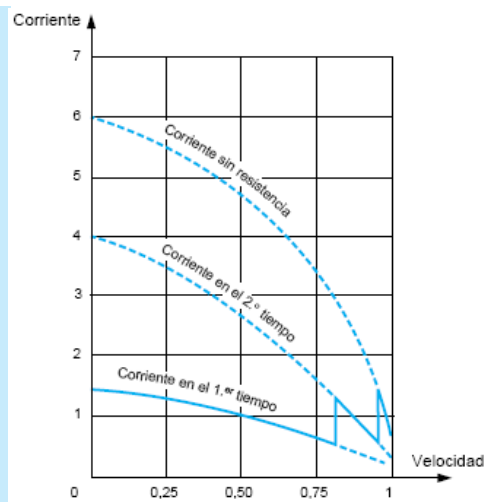
Arranque por resistencias rotóricas:

Un motor de anillos no puede arrancar en directo (devanados rotóricos cortocircuitados) sin provocar puntas de corriente inadmisibles. Es necesario insertar en el circuito rotórico resistencias que se cortocircuiten progresivamente, al tiempo que se alimenta el estator a toda la tensión de red.

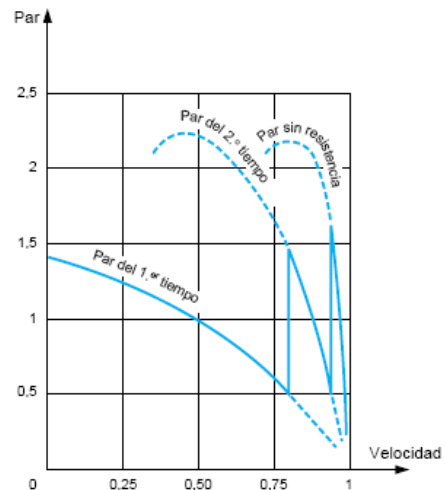
El cálculo de la resistencia insertada en cada fase permite determinar con rigor la curva de par-velocidad resultante: Para un par dado, la velocidad es menor cuanto mayor sea la resistencia. Como resultado, la resistencia debe insertarse por completo en el momento del arranque y la plena velocidad se alcanza cuando la resistencia está completamente cortocircuitada.



Arranque rotórico por resistencias



Curva de corriente / velocidad por arranque rotórico



Curva de par / velocidad por arranque rotórico

La corriente absorbida es prácticamente proporcional al par que se suministra. Como máximo, es ligeramente superior a este valor teórico.

Por ejemplo, la punta de corriente correspondiente a un par de arranque de 2 Cn es aproximadamente de 2 In. Por tanto, la punta es considerablemente más débil, y el par máximo de arranque más elevado, que en el caso de un motor de jaula, en el que el valor normal se sitúa en torno a 6 In para 1,5 Cn.

El motor de anillos con arranque rotórico se impone, por tanto, en todos los casos en los que las puntas de corriente deben ser débiles y cuando las máquinas deben arrancar a plena carga.

Por lo demás, este tipo de arranque es sumamente flexible, ya que resulta fácil adaptar el número y el aspecto de las curvas que representan los tiempos sucesivos a los requisitos mecánicos o eléctricos (par resistente, valor de aceleración, punta máxima de corriente, etc.).

4.4. Arranque por autotransformador

El motor se alimenta a tensión reducida mediante un autotransformador que, una vez finalizado el arranque, queda fuera del circuito.

El arranque se lleva a cabo en tres tiempos:

- En el primer tiempo, el autotransformador comienza por acoplarse en estrella y, a continuación, el motor se acopla a la red a través de una parte de los devanados del autotransformador.

El arranque se lleva a cabo a una tensión reducida que se calcula en función de la relación de transformación.

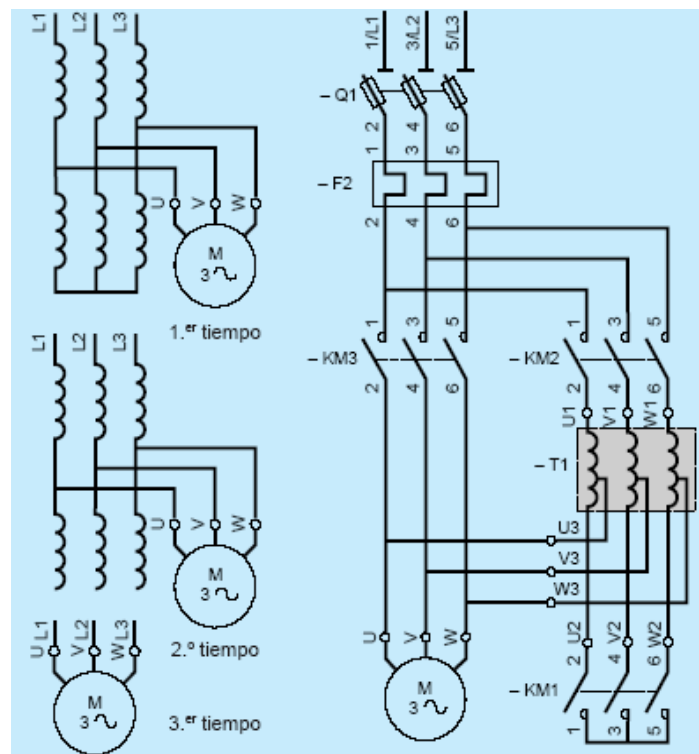
Generalmente, el transformador está dotado de tomas que permiten seleccionar la relación de transformación y, por tanto, el valor más adecuado de la tensión reducida.

- Antes de pasar al acoplamiento a plena tensión, la estrella se abre. En ese momento, la fracción de bobinado conectada a la red crea una inductancia en serie con el motor. Esta operación se realiza cuando se alcanza la velocidad de equilibrio, al final del primer tiempo.
- El acoplamiento a plena tensión interviene a partir del segundo tiempo, normalmente muy corto (una fracción de segundo). Las inductancias en serie con el motor se cortocircuitan y, a continuación, el autotransformador queda fuera del circuito.

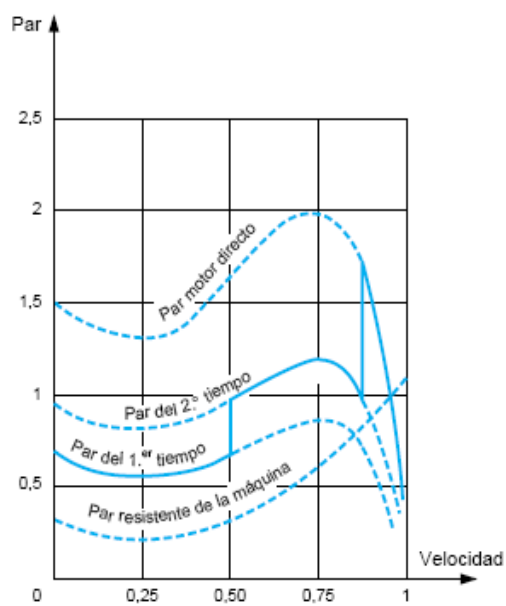
La corriente y el par de arranque varían en la misma proporción. Se dividen por $(U_{\text{red}} / U_{\text{reducida}})^2$ y se obtienen los valores siguientes:

$$I_d = 1,7 \text{ a } 4 I_n$$

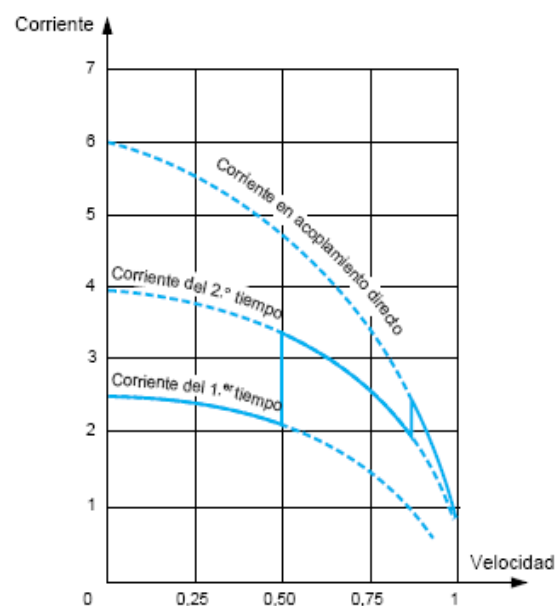
$$C_d = 0,5 \text{ a } 0,85 C_n$$



Arranque por autotransformador.



Curva de corriente / velocidad en arranque por autotransformador



Curva de par / velocidad en arranque por autotransformador

El arranque se lleva a cabo sin interrupción de corriente en el motor, lo que evita que se produzcan fenómenos transitorios.

No obstante, si no se toman ciertas precauciones pueden aparecer fenómenos transitorios de igual naturaleza durante el acoplamiento a plena tensión. De hecho, el valor de la inductancia en serie con el motor tras la apertura de la estrella es importante si se compara con la del motor. Como consecuencia, se produce una caída de tensión considerable que acarrea una punta de corriente transitoria elevada en el momento del acoplamiento a plena tensión. El circuito magnético del autotransformador incluye un entrehierro que disminuye el valor de la inductancia para paliar este problema. Dicho valor se calcula de modo que, al abrirse la estrella en el segundo tiempo, no haya variación de tensión en las bornas del motor.

El entrehierro aumenta la corriente magnetizante del autotransformador. Dicha corriente aumenta la corriente solicitada en la red durante el primer tiempo del arranque.

Este modo de arranque suele utilizarse en los motores con potencia superior a 100 kW. Sin embargo, el precio de los equipos es relativamente alto debido al elevado coste del autotransformador.

Características fundamentales:

- Corriente inicial de arranque: $1,7$ a $4 I_n$
- Par inicial de arranque: $0,4$ a $0,85 M_n$
- Duración media del arranque: 7 a 12 s

M_n = Par nominal

I_n = Intensidad nominal

Aplicaciones básicas:

- Máquinas de gran potencia o de fuerte inercia en los casos donde la reducción de la punta de intensidad es un criterio importante.

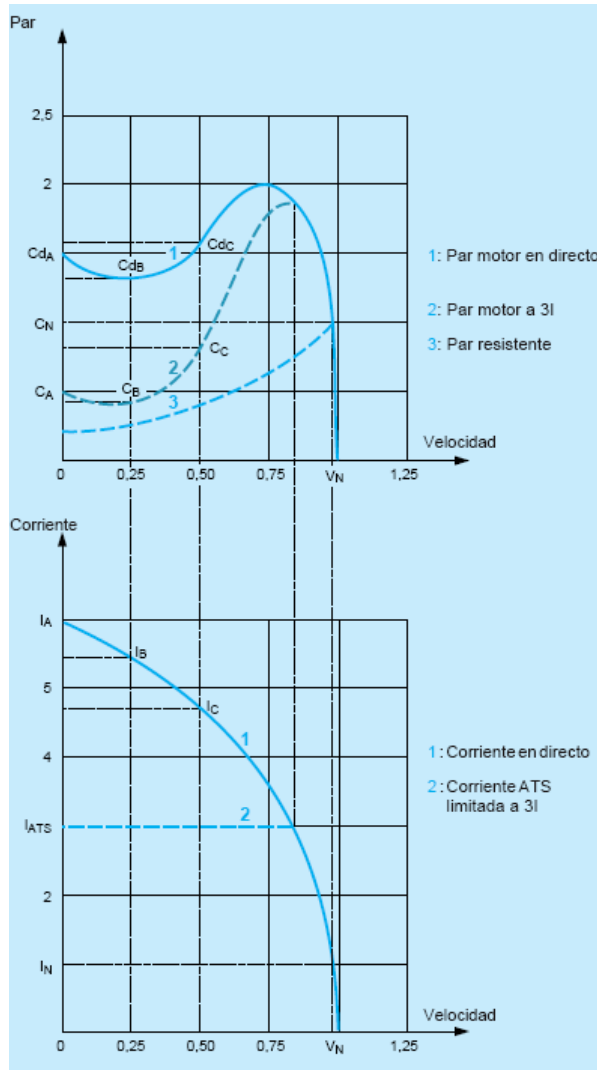
Ventajas:

- Buena relación par / intensidad.
- Posibilidad de ajuste de los valores de arranque.
- No hay corte de la alimentación durante el arranque

Inconvenientes:

- Necesita un autotransformador.
- Dimensiones importantes.

4.5. Arranque por arrancador estático o electrónico



En cada uno de los puntos, el par, de frecuencia fija, es proporcional al cuadrado de la tensión de alimentación: $C = k U^2$, o a la relación del cuadrado de las corrientes. Por tanto es posible escribir:

$$C_A = C_{dA} \left(\frac{I_{ATS}}{I_A} \right)^2$$

$$C_B = C_{dB} \left(\frac{I_{ATS}}{I_B} \right)^2$$

$$C_C = C_{dC} \left(\frac{I_{ATS}}{I_C} \right)^2 \dots$$

Curvas de corriente / velocidad y par / velocidad en el arrancador electrónico

La alimentación del motor durante la puesta en tensión se realiza mediante una subida progresiva de la tensión, lo que posibilita un arranque sin sacudidas y reduce la punta de corriente. Para obtener este resultado, se utiliza un graduador de tiristores montados en oposición de 2 por 2 en cada fase de la red. La subida progresiva de la tensión de salida puede controlarse por medio de la rampa de aceleración, que depende del valor de la corriente de limitación, o vincularse a ambos parámetros.

Un arrancador ralentizador progresivo es un graduador de 6 tiristores que se utiliza para arrancar y parar de manera controlada los motores trifásicos de jaula.

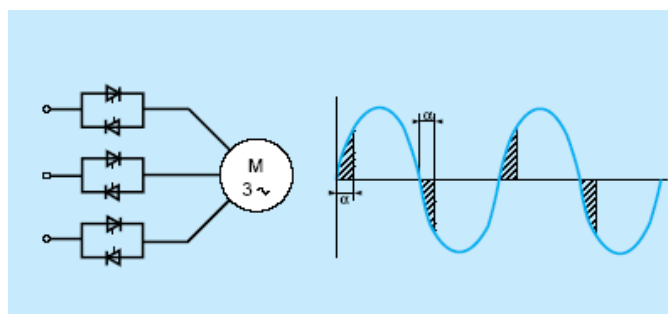


Diagrama de arrancador electrónico

Garantiza:

- El control de las características de funcionamiento, principalmente durante los períodos de arranque y parada.
- La protección térmica del motor y del arrancador.
- La protección mecánica de la máquina accionada, mediante la supresión de las sacudidas de par y la reducción de la corriente solicitada.

La corriente (I_{ATS} en el gráfico anterior de curvas de corriente / velocidad y par / velocidad) puede regularse de 2 a 5 I_n , lo que proporciona un par de arranque regulable entre 0,1 y 0,7 del par de arranque en directo. Permite arrancar todo tipo de motores asíncronos. Puede cortocircuitarse para arrancar por medio de un contactor y mantener al mismo tiempo el dominio del circuito de control.

A todo ello hay que añadir la posibilidad de:

- Deceleración progresiva.
- Parada ralentizada.

4.6. Arranque por variador de velocidad

Durante mucho tiempo, las posibilidades de regulación de la velocidad de los motores asíncronos han sido muy escasas. En la mayoría de los casos, los motores de jaula se utilizaban a su velocidad nominal. Los únicos motores que disponían de varias velocidades fijas eran los de acoplamiento de polos y los de devanados separados, que todavía se emplean de manera habitual.

Actualmente, los convertidores de frecuencia permiten controlar a velocidad variable los motores de jaula. De este modo, pueden utilizarse en aplicaciones que, hasta hace poco, quedaban reservadas para los motores de corriente continua.

Velocidad de sincronización

La velocidad de sincronización 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 constituyen el estator.

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

N: Velocidad de sincronización en r.p.m.

f: Frecuencia en Hz

p: Número de pares de polos.

La siguiente tabla contiene la velocidad de rotación del campo giratorio, o velocidad de sincronización, correspondiente a las frecuencias industriales de 50 Hz y 60 Hz y a la frecuencia de 100 Hz, en base al número de polos.

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	450	750

Estos datos no significan que sea posible aumentar la velocidad de un motor asíncrono alimentándolo a una frecuencia superior a la prevista aunque la tensión esté adaptada. Es conveniente comprobar si su diseño mecánico y eléctrico lo permiten.

Teniendo en cuenta el deslizamiento, las velocidades de rotación en carga de los motores asíncronos son ligeramente inferiores a las velocidades de sincronización que figuran en la tabla.

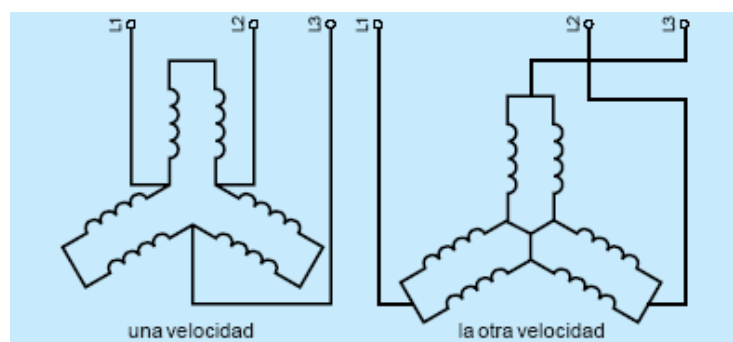
Durante mucho tiempo, las posibilidades de regulación de la velocidad de los motores asíncronos han sido muy escasas. En la mayoría de los casos, los motores de jaula se utilizaban a su velocidad nominal. Los únicos motores que disponían de varias velocidades fijas eran los de acoplamiento de polos y los de devanados separados, que todavía se emplean de manera habitual. Actualmente, los convertidores de frecuencia permiten controlar a velocidad variable los motores de jaula. De este modo, pueden utilizarse en aplicaciones que, hasta hace poco, quedaban reservadas para los motores de corriente continua.

MOTORES DE JAULA

La velocidad de un motor de jaula, según se ha descrito anteriormente, depende de la frecuencia de la red de alimentación y del número de pares de polos. Por consiguiente, es posible obtener un motor de dos o varias velocidades mediante la creación de combinaciones de bobinados en el estator que correspondan a distintos números de polos.

Motores de acoplamiento de polos:

Este tipo de motores sólo permite relaciones de velocidad de 1 a 2 (4 y 8 polos, 6 y 12 polos, etc.). Consta de seis bornas.



Motor de acoplamiento de polos

Dependiendo de sus características, los motores pueden ser de potencia constante, par constante o par y potencia variables.

Para una de las velocidades, la red se conecta a las tres bornas correspondientes. Para la segunda, dichas bornas están conectadas entre sí y la red se conecta a las otras tres.

Normalmente el arranque se realiza de manera directa, tanto a alta como a baja velocidad.

En ciertos casos, si las condiciones de uso lo requieren y el motor lo permite, el dispositivo de arranque pasa automáticamente a baja velocidad antes de activar la alta velocidad o antes de la parada.

Dependiendo de las corrientes absorbidas durante los acoplamientos a Baja Velocidad o Alta Velocidad, uno o dos relés térmicos pueden encargarse de la protección.

Generalmente, el rendimiento de este tipo de motores es poco elevado y su factor de potencia, bastante débil. Cuando es necesario que varios motores de este tipo funcionen de manera conjunta, se desaconseja su conexión en paralelo.

De hecho, aunque los motores sean de idéntica potencia y fabricación, se producen circulaciones de corriente que los relés de protección no pueden asimilar correctamente.

Motores de devanados estatóricos separados

Estos motores, que constan de dos devanados estatóricos eléctricamente independientes, permiten obtener cualquier relación de dos velocidades. Dado que los devanados para baja velocidad (BV) deben soportar las restricciones mecánicas y eléctricas derivadas del funcionamiento del motor a alta velocidad (AV), sus características eléctricas dependen de ello. En ocasiones, un determinado motor funcionando a BV puede absorber una corriente superior que cuando lo hace a AV.

También es posible obtener motores de tres o cuatro velocidades mediante el acoplamiento de los polos en uno de los devanados estatóricos o en ambos. Esta solución requiere que los bobinados dispongan de tomas adicionales.

Sistemas de variación de velocidad

El convertidor de frecuencia:

Principio:

El objetivo del convertidor de frecuencia consiste en alimentar los motores asíncronos trifásicos de jaula.

Se basa en un principio similar a la técnica **PWM** (1). Garantiza la rotación regular y libre de sacudidas de las máquinas, incluso a baja velocidad, gracias a una forma de corriente de salida muy próxima a la senoide.

Descripción del funcionamiento:

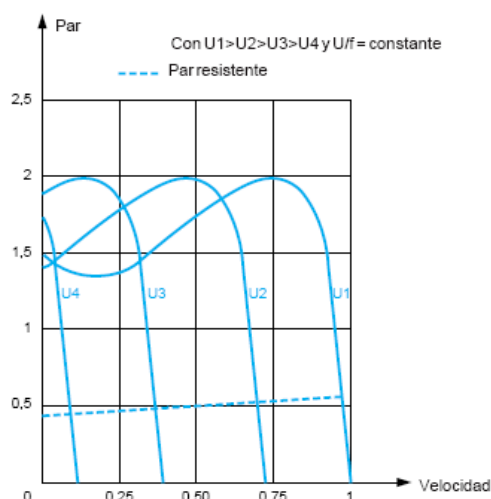
El puente rectificador y los condensadores de filtrado convierten la tensión alterna monofásica o trifásica de la red en tensión continua. A continuación, un puente ondulator de transistores conmuta la tensión continua para generar una serie de impulsos de anchura variable.

El ajuste de la anchura de los impulsos y de su repetición permite regular la tensión y la frecuencia de alimentación del motor para mantener una relación U/f constante y, por tanto, el flujo deseado en el motor. La inductancia del motor realiza el alisado de la corriente (consulte el esquema siguiente).

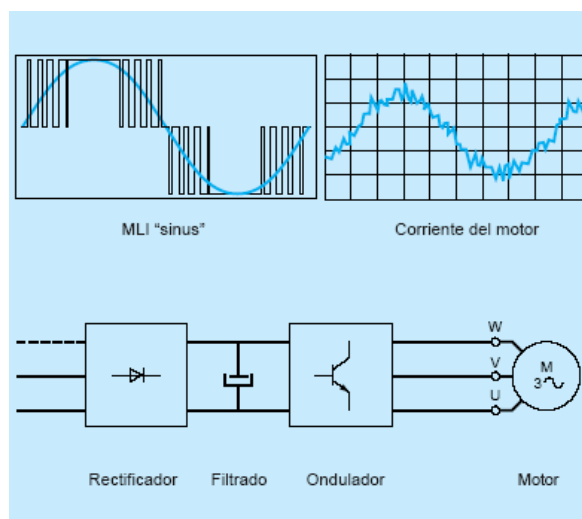
El control de la modulación se lleva a cabo por medio de un microprocesador y un **ASIC** (2). La modulación depende de las tensiones y las frecuencias, por tanto, de las velocidades solicitadas en la salida.

(1) **PWM**: Modulación de anchura de los impulsos según una ley sinus. PWM “sinus”, en inglés: Pulses Width Modulation “sinus”.

(2) **ASIC**: Application Specific Integrated Circuit, circuito integrado de aplicación específica.



Curva de par / velocidad del arranque con convertidor de frecuencia



Esquema de base de un convertidor de frecuencia

Los convertidores de frecuencia son muy fáciles de utilizar para alimentar un motor de jaula estándar. El par que se obtiene permite accionar todo tipo de máquinas, incluyendo las de fuerte par resistente.

En caso de par de arrastre, existe una opción que permite el funcionamiento en los cuatro cuadrantes.

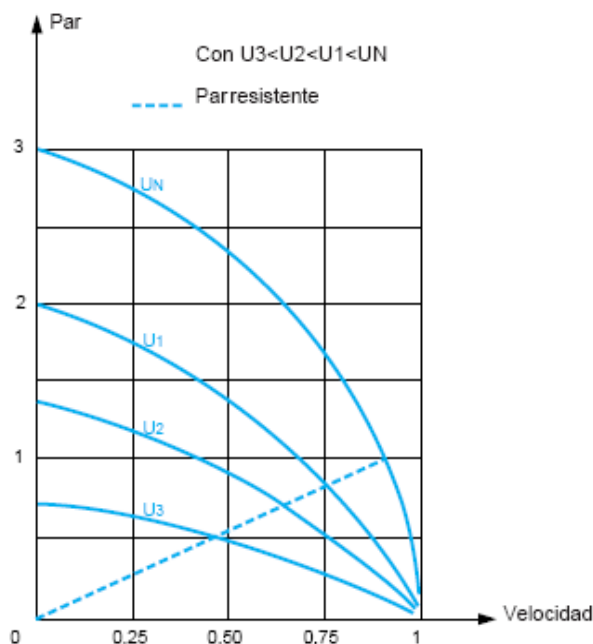
El convertidor de frecuencia hace posible que el motor funcione en ambos sentidos de la marcha y permite la opción de frenado. La frecuencia de salida puede ser superior a la de alimentación.

El variador también se utiliza como arrancador o ralentizador para la puesta en marcha y la parada progresiva adaptada a una rampa. Integra la protección térmica del motor.

El diálogo con el operador se simplifica gracias a los diodos electroluminiscentes, los visualizadores de 7 segmentos, las consolas de puesta en servicio y la posibilidad de interconexión con un microordenador de tipo PC. El diálogo con los automatismos puede realizarse por medio de un enlace serie o de un bus multipunto.

El variador de tensión:

Esta solución tiende a desaparecer como resultado de los avances conseguidos por los convertidores de frecuencia.



Curva par/velocidad del arranque con variador de tensión

El par que suministra un motor asíncrono es proporcional al cuadrado de la tensión de alimentación. El principio de funcionamiento consiste en reducir el par resistente a la velocidad deseada. La modulación de tensión se obtiene mediante la variación del ángulo de encendido de dos tiristores montados en oposición en cada fase del motor.

Este sistema de variadores de tensión se utiliza principalmente para variar la velocidad de los pequeños ventiladores. Durante el deslizamiento del motor, las pérdidas en el rotor son proporcionales al par resistente e inversamente proporcionales a la velocidad. Por tanto, el motor debe tener capacidad para disipar estas pérdidas y no debe presentar puntos de inflexión que desestabilizarían la velocidad.

Normalmente, los pequeños motores de hasta 3 kW cumplen estas condiciones. Además, hace falta un motor de jaula resistente, motovenilado en caso de que trabaje a baja velocidad.

Es posible utilizar este variador como arrancador para las máquinas con pares resistentes débiles.

Otros sistemas electromecánicos:

Los sistemas electromecánicos de regulación de velocidad se utilizan con menor frecuencia desde la generalización de los variadores de velocidad electrónicos. Se citan a continuación a título informativo.

Motores de corriente alterna con colector (Schrage):

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

Grupo Ward Leonard:

Consta de un motor de arranque y de un generador de corriente continua de excitación variable. Alimenta motores de colector o de corriente continua. La excitación se regula mediante un dispositivo electromecánico o un sistema estático electrónico.

4.7. Otros tipos de motores

Los motores asíncronos monofásicos

El motor asíncrono monofásico, aunque menos utilizado en la industria que su homólogo trifásico, representa una parte de aplicaciones nada despreciables en pequeñas potencias que utilizan una red monofásica de 220 V.

A igualdad de potencias, tienen la ventaja de ser menos voluminosos que los motores trifásicos.

Los motores monofásicos de algunas decenas de KW, son de utilización muy corriente en EE. UU.

Constitución:

Los motores monofásicos, están constituidos, al igual que los trifásicos, por un estator y un rotor.

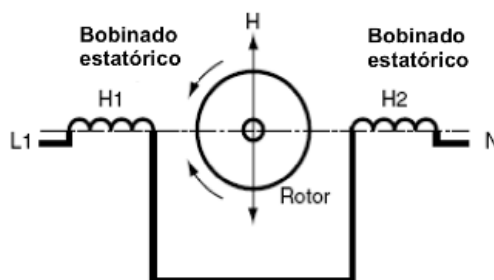
- **Estator:**

Está constituido por un número par de polos, y sus bobinas están conectadas a la tensión de alimentación.

- **Rotor:**

Es de idénticas características que el del motor trifásico.

Principio de funcionamiento:



Principio de funcionamiento de un motor asíncrono monofásico

Consideremos un estator con las dos bobinas conectadas a la tensión de alimentación $L_1 - N$.

La corriente alterna monofásica engendra en el rotor un campo magnético alterno H , que es el resultado de la superposición de dos campos magnéticos giratorios H_1 y H_2 , del mismo valor y sentidos contrarios.

En el arranque, el estator alimenta los dos campos con el mismo deslizamiento y en sentido opuesto; por lo que el motor no puede girar.

Con el fin de resolver este problema, un segundo bobinado, decalado 90° es insertado en el estator. Esta fase auxiliar es alimentada con un elemento de defasaje: Condensador o inductancia. Una vez el motor ha arrancado, la fase auxiliar puede ser eliminada.

Los motores trifásicos pueden, así mismo, funcionar con corrientes monofásicas, insertando un condensador, en serie o en paralelo, en la fase no utilizada.

Los motores trifásicos pueden, así mismo, funcionar con corrientes monofásicas, insertando un condensador, en serie o en paralelo, en la fase no utilizada.

Los motores síncronos

Constitución:

Al igual que los asíncronos, se componen de un estator y un rotor separados por el entrehierro.

Se diferencian por el hecho de que el flujo magnético no es debido a una corriente estatórica, si no que es creado, o bien por los imanes permanentes del rotor, o por la corriente inducida producida por una c.c. exterior que alimenta una bobina rotórica.

- **Estator:**

Consta de una carcasa y un circuito magnético, generalmente constituido de planchas de acero / silicio y de un bobinado trifásico, análogo al del motor asíncrono, alimentado por una corriente alterna trifásica para producir el campo giratorio.

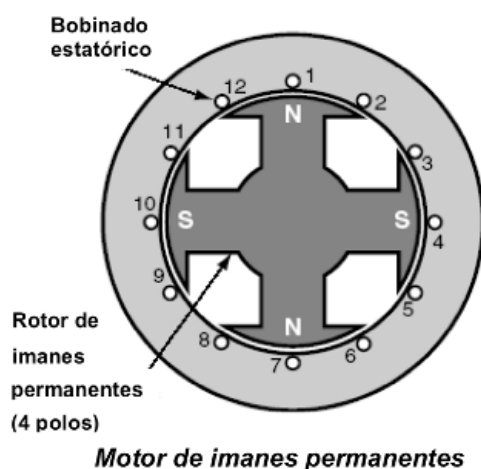
- **Rotor:**

Este, consta de los imanes o las bobinas de excitación de c.c. que crean los polos N y S intercalados.

En los motores síncronos, a diferencia de los asíncronos, el rotor gira sin deslizamiento, a la velocidad propia del campo giratorio.

Por lo expuesto podemos entender que existen dos tipos de motores síncronos: Los de imanes permanentes, y los de rotor bobinado.

Los motores síncronos de imanes permanentes, son capaces de producir un campo elevado con un pequeño volumen del motor, al tiempo que soportar importantes corrientes de sobrecarga lo que les permite aceleraciones muy rápidas.



Normalmente estos motores se asocian a variadores de velocidad para aplicaciones específicas como los robots o las máquinas - herramienta.

Los motores síncronos de rotor bobinado, son reversibles y pueden funcionar como alternadores o como motores.

Características de funcionamiento:

Ante una red a tensión y frecuencia constante, tienen las siguientes ventajosas particularidades:

- Velocidad constante, independientemente de la carga.
- Puede minimizar la potencia reactiva y, como consecuencia, mejorar el factor de potencia de una instalación.
- Soporta picos de tensión relativamente importantes: Del orden del 50% en razón de sus posibilidades de sobreexcitación.

No obstante, ante una red a tensión y frecuencia constante, tienen dos inconvenientes:

- La dificultad de arranque.
- El hecho que pueda “colgarse” si el acoplamiento resistivo supera el electromagnético máximo. En este caso se debe reiniciar el proceso de arranque.

Otros tipos de motores síncronos

- **Motores lineales**

De estructura idéntica a la de los motores rotativos, están compuestos de un estator (plataforma) y un rotor (vástago) que se desplaza en línea.

- **Motores asíncronos sincronizados**

Son motores de inducción, que en el momento del arranque funcionan en modo asíncrono y cuando llegan a una velocidad próxima a la de sincronismo, pasan a modo síncrono. Si la carga mecánica es importante, estos motores no pueden pasar a modo síncrono y actúan como asíncronos.

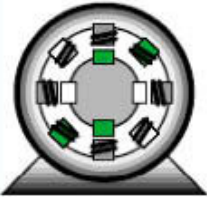
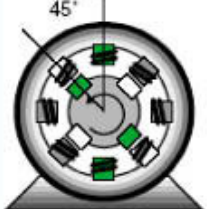
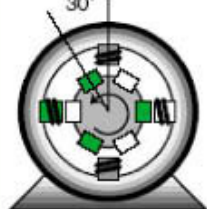
- **Los motores paso a paso**

Son unos motores que giran en función de los impulsos eléctricos que alimentan sus bobinas.

Según la alimentación eléctrica pueden ser del tipo:

- Unipolar: Si los bobinados están siempre alimentados en el mismo sentido por una tensión única.
- Bipolar: Aquellos en que sus bobinados están alimentados tanto en un sentido como en el otro, creando en un caso un polo N y en el otro un polo S.

Los motores paso a paso, pueden ser de reluctancia variable, de imanes permanentes o una combinación de ambos.

Tipo	Bipolar de imán permanente	Unipolar de reluctancia variable	Bipolar híbrido
Características	2 fases, 4 hilos	4 fases, 8 hilos	2 fases, 4 hilos
Nº pasos/vuelta	8	24	12
Etapas de funcionamiento			
Paso 1			
Estado intermedio			
Paso 1			

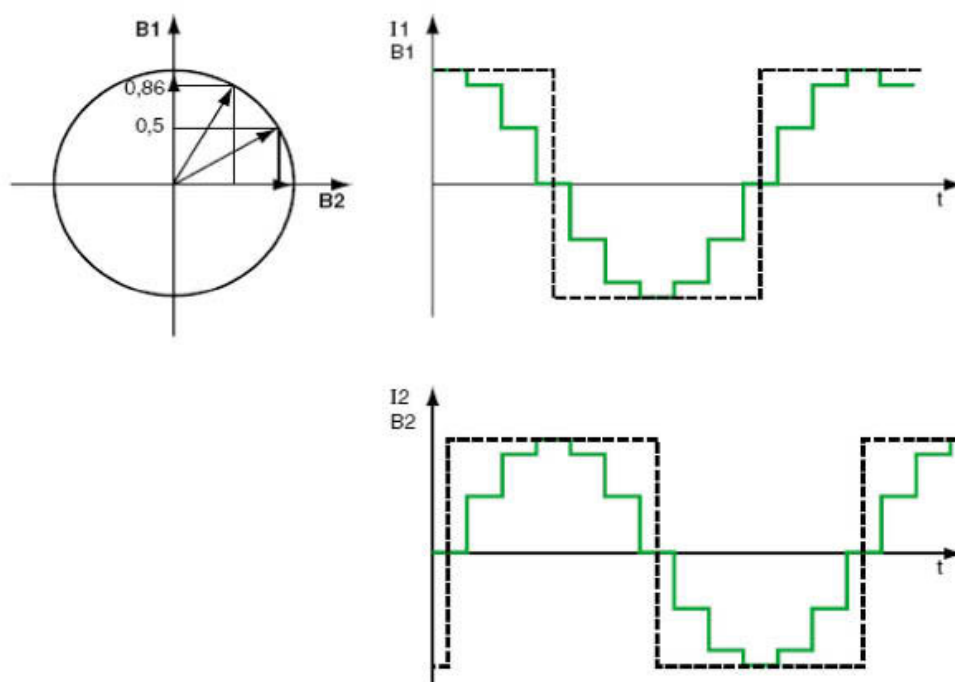
Los tres tipos de motor paso a paso

El ángulo de rotación mínimo entre dos impulsos eléctricos, se denomina paso. Una de las características del motor es el número de pasos por vuelta. Los valores más corrientes son: 48, 100 o 200 pasos por vuelta.

La rotación del motor se produce de manera discontinua. Para mejorar la resolución, este número de pasos se puede aumentar de forma totalmente electrónica (funcionamiento en micropasos).

Al hacer variar por escalones la corriente en las bobinas, se crea un campo resultante que se desplaza de un paso al otro, que tiene como consecuencia la reducción efectiva del paso.

Los circuitos por micropasos multiplican por 500 el número de pasos del motor, que pasa así, por ejemplo de 200 a 100.000 pasos.



Escalones de corriente aplicados a las bobinas de un motor paso a paso para reducir el paso

Industrialmente, estos motores, alimentados normalmente en bajas tensiones, con potencias por debajo del KW, se utilizan en aplicaciones de posicionamiento. La simplicidad de esta solución la convierten en una opción particularmente económica.

4.8. Consideraciones finales

Al hablar de los diferentes tipos de motores y de sus sistemas de arranque, nos hemos referido fundamentalmente a los motores de c.a., asíncronos, trifásicos, por ser los mas utilizados en la industria actual, aunque en el apartado anterior hemos reseñado brevemente los diferentes tipos, más significativos, existentes.

5. LOS SISTEMAS DE INVERSIÓN EN LOS MOTORES DE C.C. Y C.A.

En el presente capítulo, vamos a considerar los diferentes sistemas, actualmente utilizados, para conseguir el cambio en el sentido de giro de los motores de c.c. y/o c.a.

Nos referiremos, única y exclusivamente, al concepto de inversión de sentido de giro, ya que el resto de conceptos: Arranque, regulación, protección, control, etc., los hemos visto o veremos en otros capítulos.

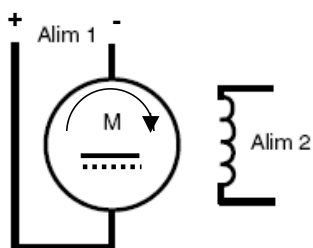
5.1. La inversión clásica en c.c.

En los motores de c.c., dado que disponemos de una alimentación con polaridad definida y constante: Polo positivo (+) y polo negativo (-), y conocemos del hecho que la creación del campo magnético generado por la circulación de corriente, origina un determinado sentido de rotación (Ley de Laplace), la inversión del sentido de giro la conseguiremos con la simple inversión de la polaridad conectada al motor.

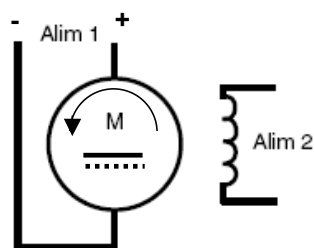
En los motores de c.c. más utilizados, lo dicho anteriormente, según ya se expuso en el capítulo de motores de c.c., lo concretaríamos de la siguiente forma:

De excitación paralelo:

- Los bobinados inducido e inductor se conectan en paralelo.
- La inversión del sentido de rotación se obtiene generalmente por inversión de la tensión del inducido.



Excitación en paralelo (+/-)



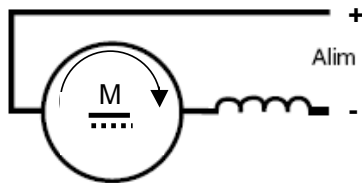
Excitación en paralelo (-/+)

De excitación serie:

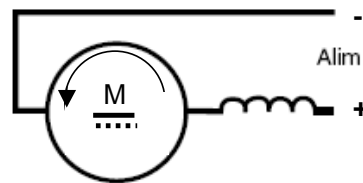
- La construcción de este motor es similar a la del motor de excitación separada.

El bobinado inductor se conecta en serie al inducido, lo que da origen a su nombre.

- La inversión del sentido de rotación se obtiene indistintamente por inversión de las polaridades del inducido o del inductor.



Excitación serie (+/-)

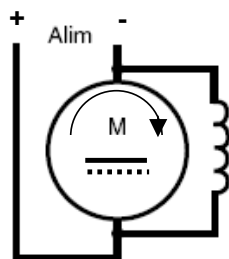


Excitación serie (-/+)

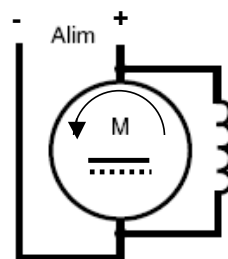
De excitación shunt:

- Los bobinados del inducido y del inductor, están alimentados por circuitos independientes, por cuestiones de adaptación o características de la máquina (por ejemplo: tensión del inducido = 400 V y tensión del inductor = 180 V).
- La inversión del sentido de rotación, normalmente, se obtiene por la inversión de la polaridad del inducido, por disponer, en este caso, de constantes de tiempo más reducidas.

La mayoría de motores de cc con variador bidireccional, trabajan en este sistema.



De excitación shunt (+/-)

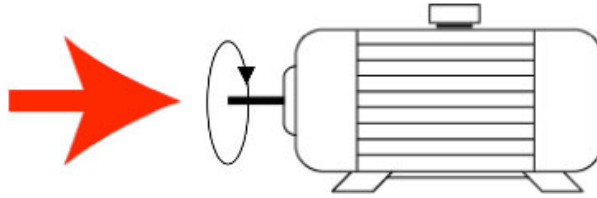


De excitación shunt (-/+)

5.2. La inversión clásica en c.a.

La inversión de sentido de giro en los motores de c.a., se realiza por el cambio en el orden de suministro de las fases de corriente.

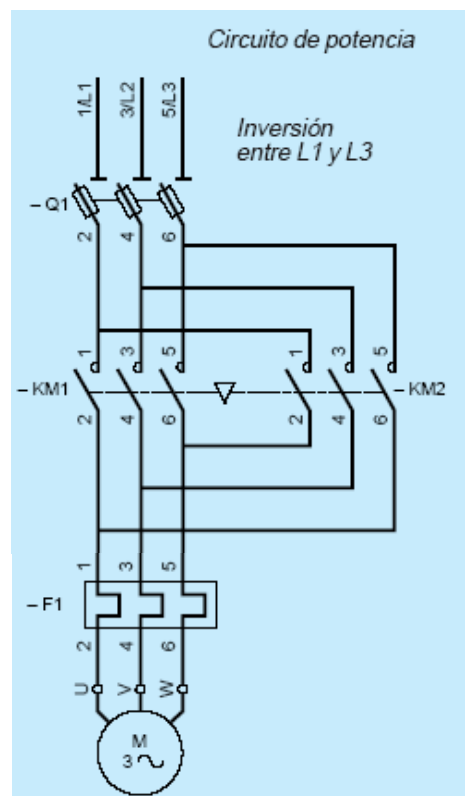
En el caso más genérico de un motor trifásico, alimentando con las fases L1, L2, L3, conectadas ordenadamente a sus bornes, debe girar a derechas, mirando desde el lado del acoplamiento.



Sentido de giro de un motor de c.a.

Por lo expuesto, para invertir el sentido de giro, bastará con alimentar con las fases en cualquier otro orden, por ejemplo: L3, L2, L1.

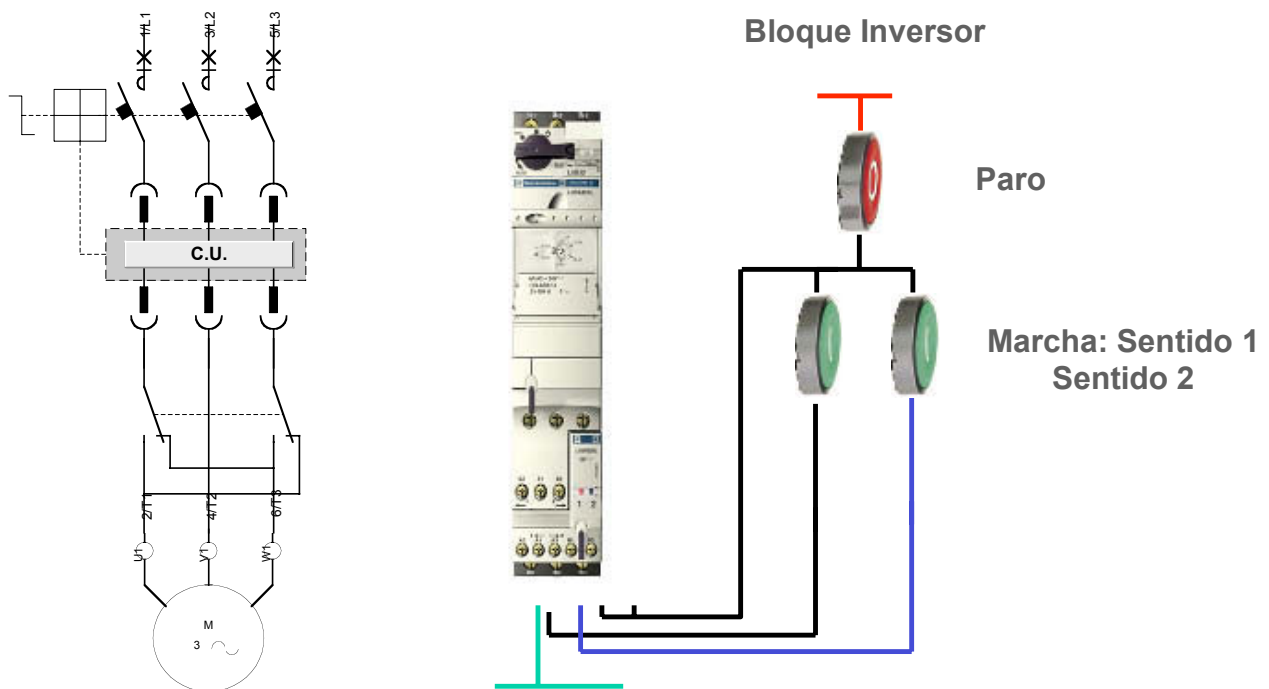
Normalmente esto lo podremos realizar, bien con la ayuda de un conmutador, o de un contactor.



Inversión de sentido de giro mediante contactores

5.3. Arrancadores compactos

Actualmente, los nuevos sistemas nos permiten, no utilizar 2 contactores para la acción de inversión de giro, sino un dispositivo que lo que hace es conmutar los contactos de un contactor único.



Inversión de sentido de giro mediante inversor "Tesis U"

La utilización de estas nuevas tecnologías, nos permite: Simplificar el conexionado, minimizar el espacio, facilitar el mantenimiento, ahorrar costos, etc.

6. GENERALIDADES SOBRE LA REGULACIÓN EN LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS (MOTORES)

Como ya hemos comentado en capítulos anteriores, los motores asíncronos trifásicos de jaula de ardilla se encuentran entre los más utilizados para el accionamiento de máquinas; su uso se impone en la mayoría de las aplicaciones debido a las ventajas que conllevan: robustez, sencillez de mantenimiento, facilidad de instalación, bajo coste, etc.; por este motivo, una vez más, en este capítulo vamos a referirnos fundamentalmente a ellos.

En cuanto nos enfrentemos a la necesidad de regular: el arranque, la velocidad o el frenado de un motor, podremos recurrir, básicamente, a los siguientes sistemas:

- El arrancador electrónico.
- El variador de velocidad.



Arrancador electrónico



Variador de velocidad

6.1. El arrancador electrónico

El arrancador electrónico, está basado el principio del regulador de tensión para motores asíncronos.

Un regulador de tensión puede alimentar, bajo tensión variable y frecuencia fija, distintos tipos de receptores: alumbrado, calefacción, motores, etc.

En lo referente al control de motores, el regulador de tensión se utiliza como arrancador-ralentizador progresivo en motores asíncronos de jaula de ardilla.

Arrancador-ralentizador progresivo: Arrancador electrónico

El regulador de tensión es un excelente arrancador para aquellos casos en los que no es necesario un par de arranque elevado (el par es proporcional al cuadrado de la tensión: $C = kU^2$). En caso de ser necesario, es posible aumentar este par mediante el uso de motores dotados de una jaula adicional para el arranque (motores de doble jaula).

El arrancador electrónico lleva a cabo la aceleración y deceleración progresivas de los motores asíncronos de jaula sin sacudidas, picos de corriente ni caídas de tensión excesivas, incluso en el caso de fuertes inercias.

Su circuito de potencia incluye, normalmente, 2 tiristores montados en oposición por cada una de las fases. La variación de tensión se obtiene por medio de la variación del tiempo de conducción de los tiristores durante cada semiperíodo.

Cuanto mayor es el retraso del momento y de cebado, menor es el valor de la tensión resultante. Y todo esto siguiendo un algoritmo de control de par.

El cebado de los tiristores se gestiona por medio de un microprocesador que, además, suele llevar a cabo las siguientes funciones:

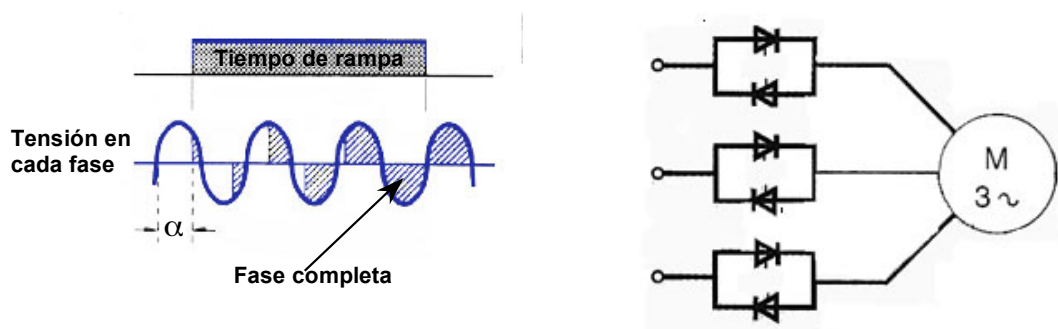
- Control del par.
- Control de las rampas de aceleración y deceleración regulables.
- Limitación de la corriente regulable.
- Sobrepar de despegue.
- Control de frenado por impulsos de corriente continua.
- Protección del variador contra sobrecargas.
- Protección del motor contra los calentamientos causados por las sobrecargas o arranques demasiado frecuentes.

- Detección de desequilibrio o ausencia de las fases y de defectos de los tiristores.

Actualmente, también es frecuente que un panel de control permita visualizar los distintos parámetros de funcionamiento y facilite la puesta en servicio, la explotación y el mantenimiento.

Los actuales arrancadores electrónicos permiten controlar el arranque y el ralentizamiento de:

- Un solo motor.
- Varios motores, simultáneamente, dentro del límite de su calibre.
- Varios motores sucesivamente, por conmutación. En régimen estable, cada motor se alimenta directamente desde la red a través de un contactor.



Comportamiento del arrancador estático o electrónico

Propiedades:

- La orden de marcha produce el cebado de los tiristores con un ángulo de retardo .
- Durante el tiempo de rampa el retardo se va reduciendo.
- Al final del tiempo de rampa el retardo es cero, llegando toda la tensión a bornas del motor.

Características:

- Par inicial de arranque: Regulable.
- Corriente inicial de arranque: Regulable.
- Duración media del arranque: Regulable.

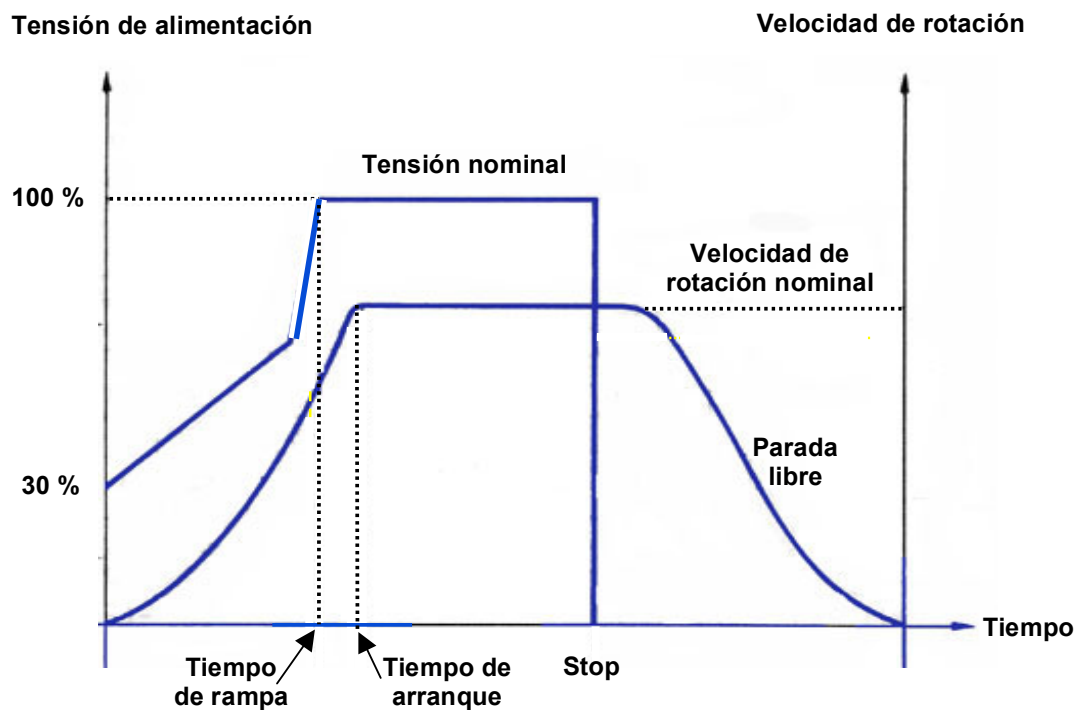
Ventajas:

- Arranque suave y parada ralentizada.

- Ajuste en la puesta en servicio.
- Solución compacta.
- Tecnología estática.

Inconvenientes:

- Precio.
- No frena.
- Tiempo parada ralentizada mayor que rueda libre.



Curva de funcionamiento del arranque electrónico

Aplicaciones:

- Bombas, ventiladores, compresores.
- Cintas transportadoras.
- Manejo de productos frágiles.
- Transmisiones a correas, a cadena, etc.

6.2. El variador de velocidad

Principales funciones de los variadores de velocidad electrónicos

Aceleración controlada

La aceleración del motor se controla por medio de una rampa de aceleración lineal o en forma de S. Generalmente, la rampa puede regularse y, por tanto, permite variar el tiempo de aceleración.

Variación de velocidad

Un variador de velocidad puede no ser al mismo tiempo un regulador. En este caso, se trata de un sistema dotado de un control con amplificación de potencia pero sin bucle de retorno. Se denomina “sistema en lazo abierto”.

La velocidad del motor queda determinada por una magnitud de entrada (tensión o corriente) denominada consigna o referencia. Para un valor dado de la consigna, la velocidad puede variar en función de las perturbaciones (variaciones de la tensión de alimentación, de la carga o de la temperatura). El rango de velocidad se expresa en función de la velocidad nominal.

Regulación de la velocidad

Un regulador de velocidad es un variador con seguimiento de velocidad. Dispone de un sistema de control con amplificación de potencia y bucle de retorno. Se denomina “sistema en lazo cerrado”.

La velocidad del motor queda determinada por una consigna, cuyo valor se compara permanentemente a una señal de retorno que representa la velocidad del motor. Generalmente, la señal procede de un generador tacométrico o de un generador de impulsos montado en el extremo del eje del motor.

Si se detecta una desviación como consecuencia de la variación de la velocidad, el valor de la consigna se corrige automáticamente para ajustar la velocidad a su valor inicial.

La regulación permite que la velocidad sea prácticamente insensible a las perturbaciones.

Generalmente, la precisión de un regulador se expresa en % del valor nominal de la magnitud regulada.

Deceleración controlada

Cuando se corta la alimentación de un motor, su deceleración se debe únicamente al par resistente de la máquina (deceleración natural). Los arrancadores y variadores electrónicos permiten controlar la deceleración por medio de una rampa lineal o en forma de S, que suele ser independiente de la rampa de aceleración. Es posible regular la rampa para que el tiempo de transición entre la velocidad en régimen estable y una velocidad intermedia o nula sea:

- Inferior al tiempo de deceleración natural:

El motor debe desarrollar un par resistente que se añade al par resistente de la máquina.

- Superior al tiempo de deceleración natural:

El motor debe desarrollar un par motor inferior al par resistente de la máquina.

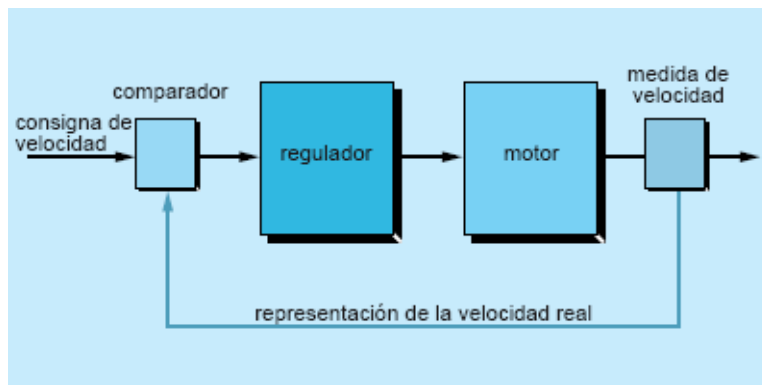
Inversión del sentido de marcha

Puede controlarse a velocidad nula después de la deceleración sin frenado eléctrico, o con frenado eléctrico, para que la deceleración y la inversión sean rápidas.

Protección integrada

Generalmente, los variadores modernos garantizan tanto la protección térmica de los motores como la suya propia. Un microprocesador utiliza la medida de la corriente para calcular el aumento de la temperatura del motor. En caso de recalentamiento excesivo, genera una señal de alarma o de fallo.

Por otra parte, los variadores, especialmente los convertidores de frecuencia, suelen incluir protección contra:



Principio de la regulación de velocidad

- Cortocircuitos entre fases y entre fase y tierra.
- Sobretensiones y caídas de tensión.
- Desequilibrios de fases.
- Funcionamiento monofásico.

Composición de los variadores de velocidad electrónicos

Los variadores de velocidad electrónicos constan de dos módulos, normalmente integrados en una misma envoltura:

- Un módulo de control, que gestiona el funcionamiento del aparato.
- Un módulo de potencia, que suministra energía eléctrica al motor.

El módulo de control

Todas las funciones de los variadores y arrancadores modernos se controlan por medio de un microprocesador que utiliza los ajustes, las órdenes transmitidas por un operador o por una unidad de tratamiento y los resultados de las medidas de velocidad, corriente, etc. En base a estos datos, el microprocesador gestiona el funcionamiento de los componentes de potencia, las rampas de aceleración y deceleración, el seguimiento de la velocidad, la limitación de corriente, la protección y la seguridad.

Según el tipo de producto, los ajustes (consignas de velocidad, rampas, limitación de corriente, etc.) se realizan por medio de potenciómetros, teclados, o desde autómatas o PC a través de un enlace serie.

Las órdenes (marcha, parado, frenado, etc.) pueden darse a través de interfaces de diálogo hombre/máquina, autómatas programables, PC, etc.

Los parámetros de funcionamiento y los datos de alarmas y de fallos pueden visualizarse a través de pilotos, diodos luminosos, visualizadores de 7 segmentos o de cristal líquido, pantallas de vídeo, etc.

En muchos casos, es posible configurar los relés para obtener información de:

- Fallos (de la red, térmicos, del producto, de secuencia, sobrecarga, etc.).
- Control (umbral de velocidad, prealarma o final de arranque).

Una alimentación independiente suministra las tensiones necesarias para el conjunto de los circuitos de medida y de control.

El módulo de potencia

Los elementos principales del módulo de potencia son:

- Los componentes de potencia.
- Los interfaces de tensión y/o de corriente.
- En aparatos de gran calibre, un conjunto de ventilación.

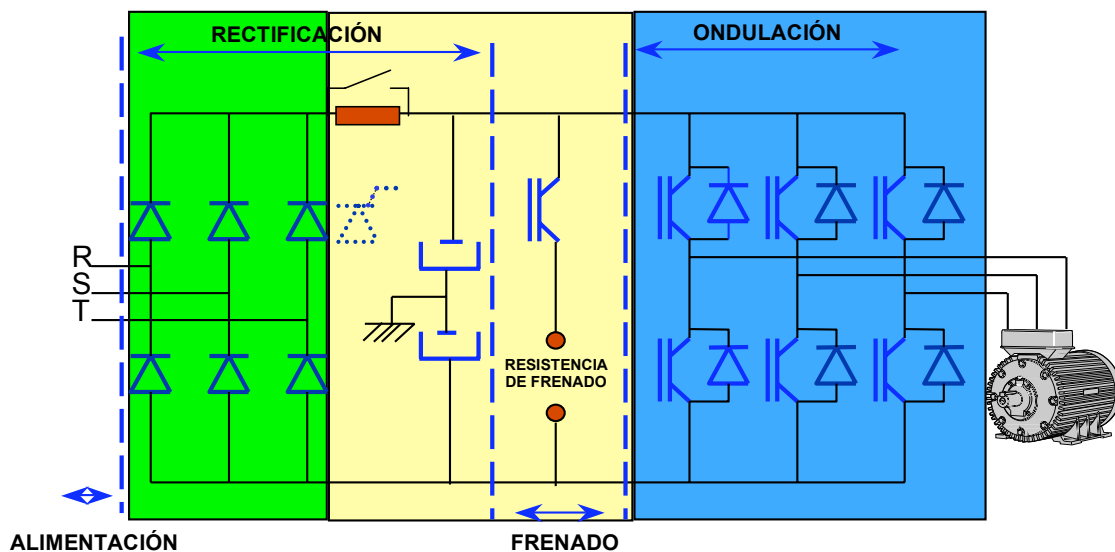
Los componentes de potencia son semiconductores (1) que funcionan en modo “Todo o Nada” y, por tanto, son similares a los interruptores estáticos de dos estados: pasante y bloqueado.

(1) Los semiconductores como el silicio son materiales cuya resistividad se sitúa entre la de los conductores y la de los aislantes. Sus átomos poseen 4 electrones periféricos. Cada átomo se asocia con 4 átomos próximos para formar una estructura estable de 8 electrones.

Un semiconductor de tipo P se obtiene mediante la incorporación al silicio puro de una pequeña proporción de un cuerpo cuyos átomos poseen 3 electrones periféricos. Por tanto, falta un electrón para formar una estructura de 8, lo que se traduce en un excedente de cargas positivas.

Un semiconductor de tipo N se obtiene mediante la incorporación de un cuerpo de 5 electrones periféricos. En este caso, existe un excedente de electrones y, por tanto, de cargas negativas.

Estos componentes, integrados en un módulo de potencia, forman un convertidor que alimenta un motor eléctrico con tensión y/o frecuencia variables a partir de la red de tensión y frecuencia fijas.



Bloques de potencia en un variador de velocidad

Componentes de potencia

El diodo

El diodo es un semiconductor no controlado que consta de dos zonas, P (ánodo) y N (cátodo), y que sólo permite que la corriente fluya en un sentido, del ánodo al cátodo. El diodo es conductor cuando la tensión del ánodo es más positiva que la del cátodo, actuando como un interruptor cerrado. Cuando la tensión del ánodo es menos positiva que la del cátodo, el diodo bloquea la corriente y funciona como un interruptor abierto.

El transistor

Es un semiconductor controlado que consta de tres zonas alternas PNP o NPN. Sólo permite que la corriente fluya en un sentido: Del emisor hacia el colector con tecnología PNP y del colector hacia el emisor con tecnología NPN. Normalmente, actúa como un amplificador. En este caso, el valor de la corriente controlada depende de la corriente de control que circula en la base. No obstante, también puede funcionar en modo “Todo o Nada”, como interruptor estático:

Abierto en ausencia de corriente de base.

Cerrado en caso de saturación. Los circuitos de potencia de los variadores utilizan este segundo modo de funcionamiento.

El tiristor

Es un semiconductor controlado que consta de cuatro capas alternas PNPN. Funciona como un interruptor estático cuyo cierre se controla mediante el envío de un impulso eléctrico a un electrodo de control denominado puerta. El cierre (o disparo) sólo es posible si la tensión del ánodo es más positiva que la del cátodo.

El tiristor se bloquea cuando se anula la corriente que lo recorre, es decir, en cada paso por cero del período alterno.

La energía de disparo suministrada a la puerta no guarda relación con la corriente que se conmuta, es una propiedad intrínseca del tiristor utilizado.

El IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

Es un tipo de transistor particular que se controla bajo tensión con muy poca energía, lo que explica la ausencia de relación entre la energía necesaria para el control y la corriente conmutada. Dada la alta velocidad de conmutación, el semiconductor debe soportar las presiones propias de una dV/dt considerable. Para minimizar dichas presiones, se utilizan inductancias y circuitos de ayuda a la conmutación compuestos por resistencias, condensadores y diodos.

El GTO (Gate Turn off Thyristor)

Es un tipo de tiristor particular cuya extinción se controla por medio de un impulso negativo. La energía necesaria para ello depende de la corriente conmutada.

El IPM (Intelligent Power Module)

Es un puente ondulator con transistores de potencia IGBT que integra su propio control de vías. El IPM reúne en la misma caja:

- 7 componentes IGBT, 6 de ellos para el puente ondulator y 1 para el frenado.
- Los circuitos de control de los IGBT.
- 7 diodos de potencia de rueda libre.
- Protecciones contra cortocircuitos, sobreintensidades y excesos de temperatura.

Principales modos de funcionamiento

Unidireccional

En electrónica de potencia, un dispositivo de conversión es unidireccional si sólo permite que la energía fluya en el sentido red-receptor.

Es posible aplicar un frenado de parada en corriente alterna mediante la conexión a la resistencia de un dispositivo de frenado distinto que disipe la energía almacenada en las piezas en movimiento.

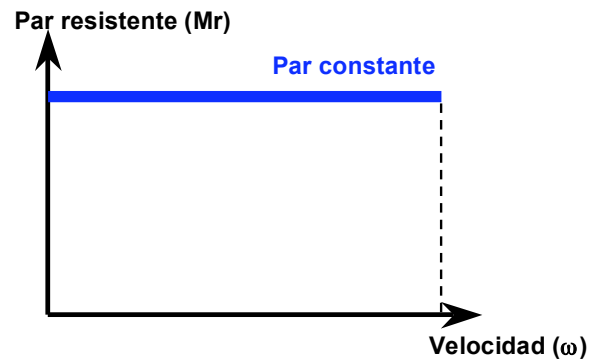
Reversible

En electrónica de potencia, un dispositivo de conversión es reversible, o bidireccional, si permite que la energía fluya en ambos sentidos: red-receptor y receptor-red.

En este caso, es posible realizar el frenado volviendo a enviar a la red de alimentación la totalidad o parte de la energía almacenada en las piezas en movimiento.

Par constante

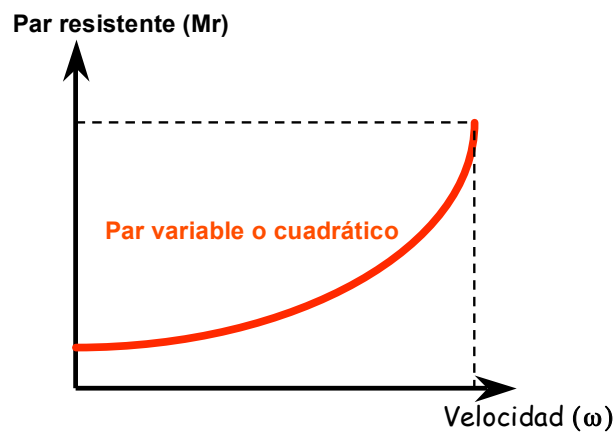
El funcionamiento es de par constante cuando el motor suministra el par nominal con independencia de la velocidad.



Gráfica par / velocidad para par constante

Par variable

El funcionamiento es de par variable cuando el motor suministra el par en función de la velocidad.



Gráfica par / velocidad para par variable

Carga arrastrante

Una carga es arrastrante cuando produce una fuerza aceleradora que actúa en el sentido del movimiento. Por ejemplo, en los dispositivos de elevación, el motor debe desarrollar un par de frenado durante la bajada para compensar la fuerza aceleradora que produce la carga.

Convertidor de frecuencia para motor asíncrono

Para obtener un par constante a cualquier velocidad, es necesario mantener el flujo constante. Para ello, la tensión y la frecuencia deben evolucionar simultáneamente y en idéntica proporción.

El convertidor de frecuencia, que se alimenta en la red a tensión y frecuencia fijas, garantiza la alimentación del motor a corriente alterna con tensión y frecuencia variables, en base a las exigencias de velocidad.

El circuito de potencia consta de un rectificador y de un ondulator que, partiendo de la tensión rectificada, produce una tensión de amplitud y frecuencia variables.

El ondulator utiliza seis transistores de potencia. El principio de la regulación es el mismo del variador-regulador de corriente continua. El ondulator puede generar una frecuencia más elevada que la de la red y, por tanto, garantizar al motor un incremento de velocidad proporcional al incremento de frecuencia. No obstante, dado que la tensión de salida del convertidor no puede superar a la de la red, el par disponible decrece en proporción inversa al aumento de la velocidad.

Por encima de su velocidad nominal, el motor deja de funcionar a par constante para hacerlo a potencia constante ($P = C_v$).

Este tipo de variador, es adecuado para la alimentación de motores asíncronos de jaula, permitiendo crear una minired eléctrica de U y f variables, capaz de alimentar varios motores en paralelo.

Consta de:

- Un rectificador con condensador de filtrado.
- Un ondulator con 6 transistores de potencia.
- Una unidad de control organizada en torno a un microprocesador que garantiza el control del ondulator.

La ondulación se obtiene mediante el corte de la tensión continua por medio de impulsos cuya duración, y por tanto longitud, se modula para que la corriente alterna resultante sea lo más senoidal posible. Esta característica condiciona la rotación regular a baja velocidad y limita los calentamientos.

La inversión de la señal de control implica la inversión del orden de funcionamiento de los componentes del ondulator y, por tanto, del sentido de rotación del motor.

Dos rampas se encargan de regular la aceleración y la deceleración.

El variador se protege a sí mismo y protege al motor contra calentamientos excesivos, bloqueándose hasta recuperar una temperatura aceptable.

Regulación

En bucle abierto, la referencia de velocidad impone una frecuencia al ondulator, lo que determina la velocidad teórica del motor. No obstante, la velocidad real varía con la carga.

En bucle cerrado, la velocidad real se controla por medio de una dinamo tacométrica. La regulación garantiza una velocidad constante.

Frenado de parada

Se obtiene mediante la inyección de corriente continua en el motor.

Frenado ralentizado

Un módulo de frenado realiza una frenada controlada. La energía de frenado se disipa en una resistencia conectada a las bornas del condensador de filtrado.

Control vectorial del flujo

Los variadores de velocidad para motores asíncronos trifásicos aumentan día a día las prestaciones de los motores asíncronos utilizados a velocidad variable.

Tradicionalmente, las aplicaciones que requerían prestaciones de accionamiento de alto nivel recurrían a soluciones basadas en motores de corriente continua.

En la actualidad, las técnicas de Control Vectorial de Flujo (CVF) permiten utilizar igualmente motores asíncronos.

Sin embargo, los motores de corriente continua se siguen utilizando en el caso de potencias muy elevadas, debido al alto coste de los variadores.

El CVF amplía el rango de funcionamiento de los motores asíncronos hacia velocidades muy bajas. Si el motor dispone de un captador de posición y, eventualmente, de una ventilación forzada, el par nominal puede suministrarse incluso en el momento de la parada, con un par transitorio máximo igual a 2 ó 3 veces el par nominal, dependiendo del tipo de motor.

Asimismo, la velocidad máxima suele alcanzar el doble de la velocidad nominal, o más si la mecánica del motor lo permite.

6.3. Las nuevas tecnologías

Control de movimiento

Las nuevas tecnologías se encaminan, cada vez más, a la oferta del control de ejes y están destinadas a las máquinas que precisan simultáneamente un control de movimiento de elevadas prestaciones asociado a un control secuencial por autómatas programables.

Presentación

Las nuevas plataformas de automatismo como las: Premium y Quantum de Shneider Electric, ofrecen en sus rangos de interfaces distintos acopladores de control de ejes que realizan la función de posicionamiento.

Estos módulos son los siguientes:

- Módulos con salida analógica:
 - Control multieje (2 a 4 ejes).
 - Control mono eje.
- Módulos con enlace digital:
 - Controla hasta 8 variadores.
 - Controla hasta 22 variadores.

Para ello disponen de los variadores específicos y de los motores brushless.

El variador de velocidad para motor brushless

Presentación

Los variadores de velocidad para motores brushless están destinados a la regulación de par, de velocidad y/o de posición de dichos motores.

Estos conjuntos de motovariadores están destinados a las aplicaciones de alto rendimiento que exigen algoritmos de seguimiento de posición de gran precisión y dinamismo.

Estos variadores se presentan normalmente según dos tipos:

- Variadores de consigna analógica + 10 V.
- Variadores con enlace numérico SERCOS.

Dichos variadores están principalmente diseñados para controlarse por acopladores de posicionamiento soportados por las plataformas de automatismos específicas.

Además, suelen disponer de un posicionador integrado utilizable en casos de aplicaciones simples que no requieran acopladores de posicionamiento.

En este caso, las numerosas posibilidades de conexión (enlace serie RS 232, bus Fipio, red Modbus Plus, bus CANopen, bus Profibus DP) permiten responder a las diferentes arquitecturas de automatismos.

Funciones

Alimentaciones

Los variadores para servomotores suelen contar con:

- Una alimentación directa a partir de la red trifásica cuyo valor nominal puede ser cualquier tensión incluida en el rango a 208...480 V, 50...60 Hz.
Si se observa una desclasificación en corriente y en velocidad máx. del motor, los mismos variadores pueden, normalmente, alimentarse con una red monofásica a 230 V.
- Resistencia a las perturbaciones electromagnéticas y no propagación de perturbaciones electromagnéticas gracias al filtro CEM integrado en los variadores de conformidad con las directivas 89/336, 92/31 y 93/68/CEE.
- Suelen ser compatibles con los regímenes de neutro TT (neutro a tierra) o TN (puesta a neutro). En caso de régimen IT (neutro aislado), es necesario prever un transformador de aislamiento con el fin de reconstituir en el secundario (lado del variador) un régimen de neutro a tierra.
- Una alimentación auxiliar en c.c. de 24 V es necesaria para la alimentación de los circuitos electrónicos internos y los interfaces de entradas/salidas (aislamiento necesario con la alimentación de potencia del motor).

Resistencia de frenado interna

Los variadores a los que nos estamos refiriendo, para motores brushless disponen así mismo de una resistencia de frenado (o resistencia ballast) interna de 80 o 200 W, según el modelo.

En función de las características de frenado deseadas, el frenado interno podrá inhibirse en beneficio de una resistencia de frenado externa de 250, 500 ó 1.500 W asociada a cada variador.

La puesta en paralelo del bus de potencia de los variadores permite la puesta en común de los condensadores internos y las resistencias de

frenado, de modo que se pueden aprovechar las capacidades de absorción y disipación acumuladas de los variadores.

Regulación/tratamiento de las señales

Suelen disponer también de:

- Tres reguladores numéricos integrados programables:
- Un regulador de corriente (imagen del par) que presenta un período de bucle de regulación de 62,5 μ s.
- Un regulador de velocidad de ganancia proporcional e integral con un período de bucle de regulación de 250 μ s,
- Un regulador de posición con un período de bucle de regulación de 250 μ s.
- Tratamiento de las señales de retorno posición motor a partir del sensor motor (resolver o codificador absoluto de alta resolución). A partir de esta información, el variador puede generar un retorno de codificador simulado que puede ser de tipo incremental o absoluto. Este retorno de codificador simulado se utiliza exclusivamente con un codificador externo.
- Dos informaciones “Todo o Nada” para controlar el automatismo:
- Una entrada de c.c. a 24 V de validación del variador.
- Una salida relé libre de potencial, fallo del variador.
- Dos entradas / dos salidas analógicas + 10 V y cuatro entradas / dos salidas “Todo o Nada” a 24 V de c.c. que permiten integrar los variadores en sistemas de control secuencial controlados por autómatas programables. Las funciones de estas entradas/salidas son configurables.

Funciones específicas de los variadores de consigna analógica

- Posicionador integrado:
Estos variadores suelen disponer, además, de la función de posicionador integrado. Esta función de posicionamiento permite realizar automatismos simples que no requieren acopladores de control de movimiento.
- Conectividad:
Los variadores disponen de un enlace serie RS 232 o enlace bus CANopen. Mediante la integración de una tarjeta opcional, se conectan a la red Modbus Plus, al bus Fipio o al bus Profibus DP.

El servomotor o motor brushless

Qué se entiende por un servo motor o motor brushless.

Es un accionamiento electromecánico que convierte pulsos eléctricos en movimientos mecánicos discretos.

El sistema de regulación funciona en lazo cerrado, por lo que necesita siempre de un mecanismo de retroalimentación de la posición.

La cantidad de movimiento y la velocidad dependen de la variable de referencia del lazo de control.

Hay tres tecnologías de motores y drives que ofrecen soluciones servo:

- Motores de corriente continua.
- Motores asíncronos o de inducción.
- Motores brushless síncronos.

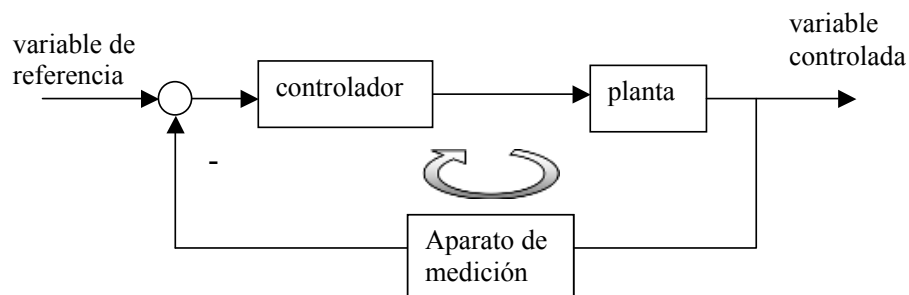
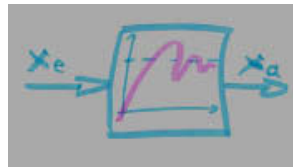


Diagrama del funcionamiento en lazo cerrado del servomotor

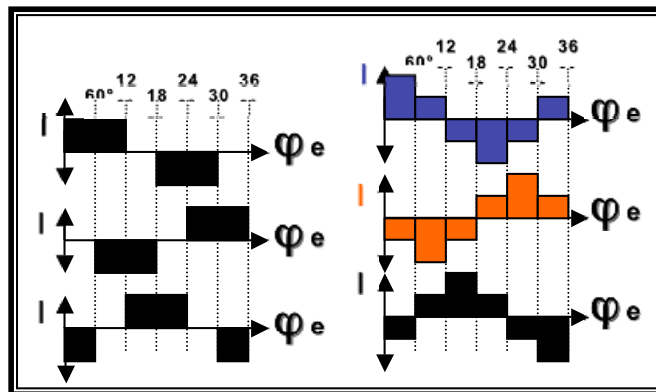
Existen principalmente dos tipos de drives para motores síncronos de imanes permanentes, diferenciados por la forma de señal de corriente que comunican el motor y por el tipo de sistema de retroalimentación:

- Drive con conmutación tipo bloque / Brushless DC.
- Drive con conmutación Sinusoidal / Brushless AC.

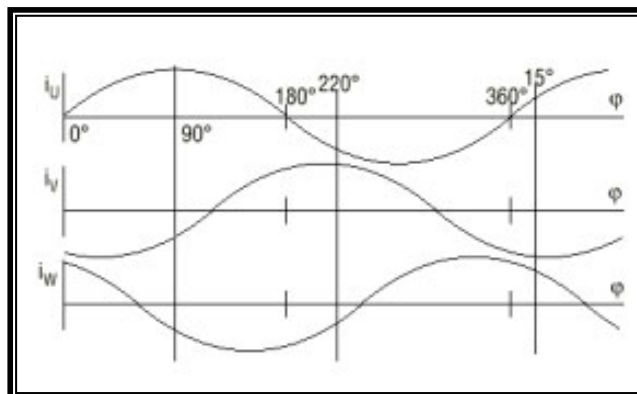
Brushless DC vs. Brushless AC

- La tecnología Brushless DC fué la primera que se aplicó para el control de motores Brushless síncronos; el desarrollo de la tecnología del tratamiento digital de la señal ha permitido el desarrollo de la tecnología Brushless AC.
- Los drives Brushless DC requieren de un encoder de baja resolución para realizar la conmutación, por motivos de coste se opta por sensores de efecto Hall; normalmente hay seis puntos de conmutación por rev. eléctrica.
- Mientras que los Brushless AC necesitan un encoder absoluto de alta resolución (4096 -16384 puntos de conmutación por vuelta).

Como veremos más adelante, los Brushless DC producen un rizado de par mayor que los brushless AC, pero la electrónica de control es más sencilla y son por ello más baratos.



Conmutación Brushless DC



Conmutación Brushless AC

Como todos los motores síncronos, el par suministrado por el motor depende de la fuerza magnética de los imanes permanentes (F_r), de la fuerza magnética de los bobinados del estator y del seno del ángulo que existe entre estas dos fuerzas:

$$T \cong F_r \times F_s \times \text{Sen}(\varphi)$$

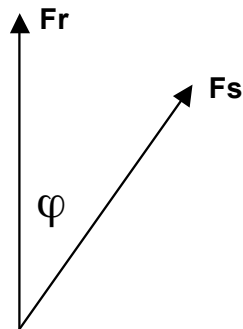


Diagrama de fuerzas magnéticas

φ : Depende de la carga, par y corriente del estator.

F_s : Depende de la corriente del estator.

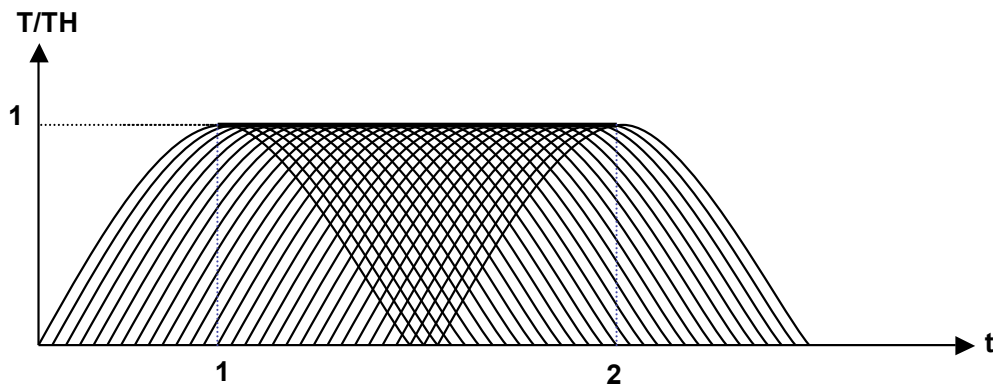
F_r : Constante.

El máximo par y la máxima eficacia se da cuando el ángulo es de 90° grados eléctricos a corriente constante.

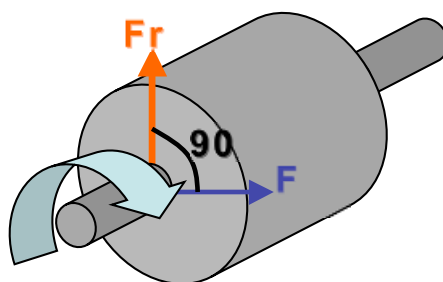
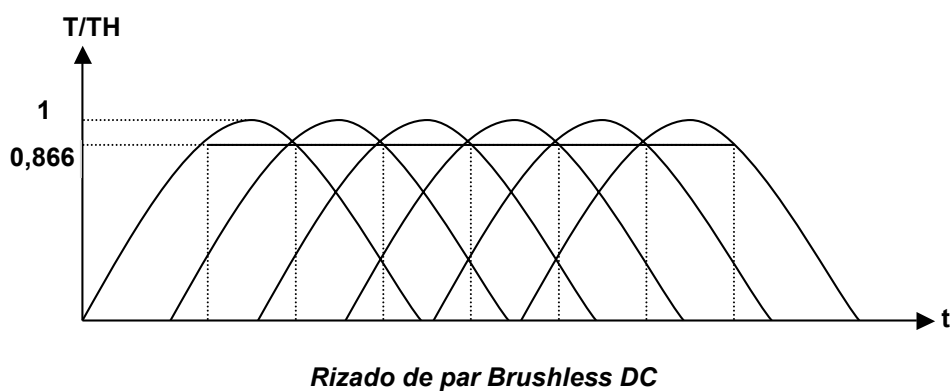
Como los drives Brushless DC sólo tienen 6 posibles posiciones de conmutación por una revolución eléctrica NO ES POSIBLE que el ángulo sea de 90° en todo momento.

En cambio el brushless AC al tener más posiciones de conmutación puede controlar la conmutación siempre alrededor de 90° .

Consecuencia: Rizado de par en los motores Brushless DC, crítico a bajas revoluciones.



Rizado de par Brushless AC



Las fuerzas magnéticas en el giro del motor Brushless

Los motores Brushless son motores trifásicos de tipo síncrono. Disponen de un sensor integrado, que puede ser un resolver o un codificador absoluto. Y pueden encontrarse en el mercado con o sin freno de aparcamiento.

Existen distintas gamas de motores, las más habituales son:

Motores SER

Disponen de imanes Neodimio Hierro Boro (Neodymium Fer Bore) (NdFeB) y ofrecen, con unas dimensiones reducidas, una densidad de potencia elevada y una dinámica de velocidad que responde a todas las necesidades de las máquinas.

Disponen de:

- Grado de estanqueidad IP 56 (extremo de eje IP 41).
- Con o sin reductor de velocidad. Estos reductores se ofrecen con tres relaciones de reducción 3:1, 5:1 y 8:1.
- Extremo de eje liso (para modelos sin reductor) o con chaveta (para modelos con reductor).

Motores BPH

Su diseño, con imán permanente de Samario Cobalto, asegura una perfecta calidad de rotación, incluso a baja velocidad. Según el modelo, disponen de:

- Grado de estanqueidad IP 65 o IP 67 (IP 54 ocasional).
- Extremo de árbol con una chaveta o liso.

Configuración e instalación

El diseño y la instalación de las aplicaciones de control de movimiento de las plataformas de automatismos se efectúan con los softwares específicos.



Motor Brushless

Un servo motor debe ofrecer:

- Gran precisión de posicionado.
- Estabilidad de velocidad.
- Alta estabilidad de par.
- Repetitividad del movimiento.
- Elevada respuesta dinámica.
- Configuración sencilla del sistema.
- Bajo costo.

Características de los servos que influyen en una buena respuesta dinámica:

- Capacidad de sobre-par en momentos puntuales, hasta 3 veces el par nominal, para conseguir aceleraciones / deceleraciones rápidas.
- Alta capacidad de aceleración. Esta característica depende del par y de la inercia del motor.
- Estabilidad de par en un rango amplio de velocidades, incluso a motor parado.

Parametros constructivos que afectan a la respuesta dinámica:

- **Peso:**

Los servomotores Brushless síncronos ofrece una mayor densidad de par. Esto es de gran importancia en los casos en los que los motores están montados sobre la parte móvil.



Comparativa entre rotor de motor asíncrono y de servomotor

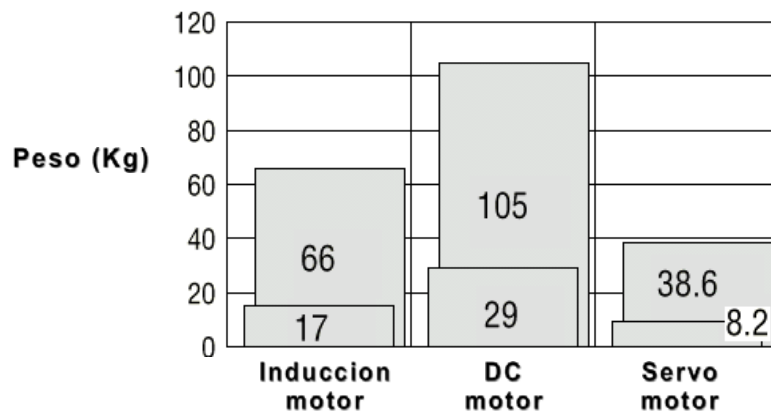


Tabla comparativa de los distintos pesos de motores según tipo

Motores asíncronos:	8,8	kg/kW
Motores CC:	12,7	kg/kW
Motores Brushless síncronos:	5,2	kg/kW

Momento de inercia

Los servomotores Brushless síncronos son con diferencia los de menor inercia.

Un servomotor de CC tiene una inercia 467% mayor y un motor asíncrono una inercia 220% mayor.

Un momento de inercia bajo es particularmente importante en términos de respuesta dinámica, sin embargo, puede ser desfavorable cuando a inercia de la masa a mover es alta.

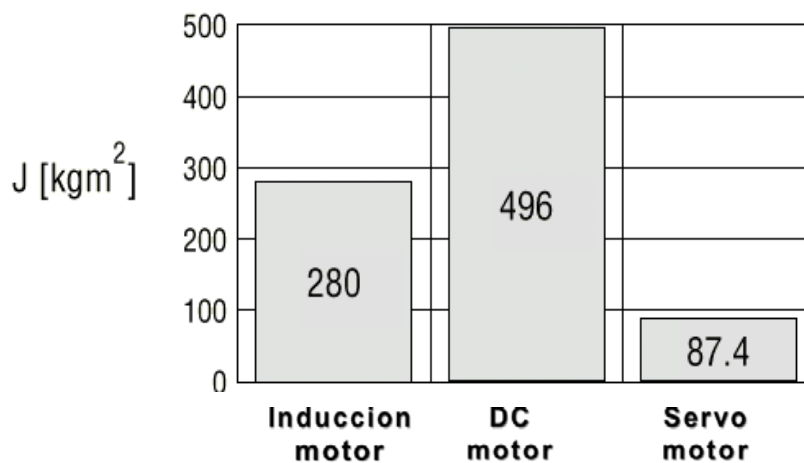


Tabla comparativa de los distintos momentos de inercia de motores según tipo

Tiempo de aceleración

Por el alto par máximo y la baja inercia de los motores Brushless síncronos, éstos se caracterizan por un tiempo de aceleración muy bajo.

Un servomotor CC tiene un tiempo de aceleración 1000% mayor y un motor asíncrono tiene un tiempo de aceleración 400% mayor.

Por ello los servomotores Brushless síncronos son óptimos en aplicaciones de dinámica elevada.

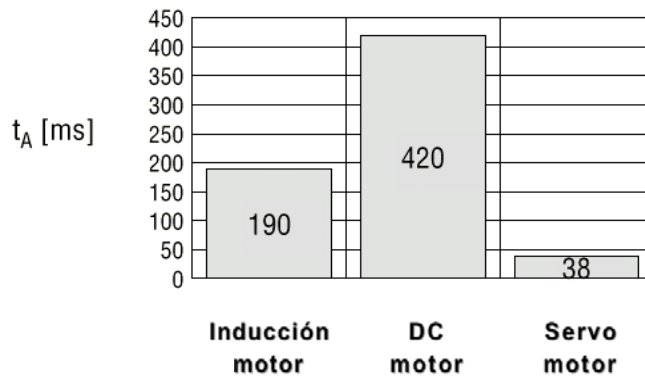


Tabla comparativa de las distintas aceleraciones de motores según tipos

Respuesta dinámica

Los servomotores Brushless síncronos son con diferencia los de mejor respuesta dinámica.

Los servomotores de CC tienen un 10% de su respuesta dinámica y los servomotores asíncronos un 20%.

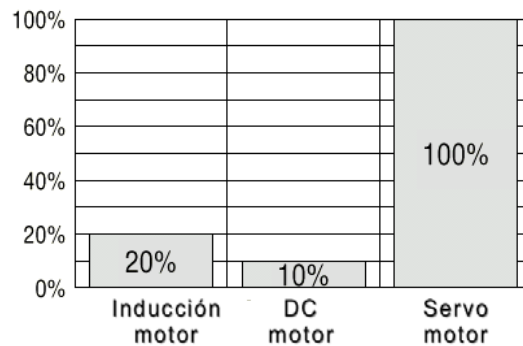


Tabla comparativa de los distintos comportamientos dinámicos de motores según tipos

Conclusiones

Los motores Brushless síncronos presentan unas características dinámicas, que los hacen ideales para aplicaciones de alta dinámica.

En aplicaciones de baja y media dinámica, las soluciones basadas en servomotores asíncronos son una solución barata. Esto ha hecho que hasta ahora hayan sido la solución adoptada por muchos fabricantes.

Pero el hecho de que el estator induzca un campo magnético en el rotor, hace que la eficiencia no sea tan alta.

El mayor precio de las soluciones con motores Brushless síncronos se debe a los siguientes factores:

- Los motores incluyen **siempre** un encoder de alta resolución utilizado para la conmutación, el control de velocidad y el control de posición.
- El rotor incluye imanes permanentes de tierras raras.
- Las mayores exigencias de conmutación y de precisión hacen que la electrónica de los controladores sea más cara.
- La reducción de costos y el aumento de exigencias en las prestaciones de las máquinas van a posibilitar a los motores Brushless síncronos entrar en máquinas que han utilizado tradicionalmente servomotores asíncronos.
- Los fabricantes de variadores para motores de inducción intentan, a su vez, mejorar las prestaciones y con los variadores de control de flujo vectorial intentan mejorar las prestaciones, para acceder al mercado de dinámica media-alta, aunque se incrementa así el precio de la solución.
- Por motivos intrínsecos a la tecnología, se puede asegurar que las prestaciones de los servomotores de inducción no podrán alcanzar a las de los servomotores Brushless síncronos.

¿Por qué motores brushless?

- Los motores convencionales tienen pérdidas en el cobre y en el hierro.
- En motores con escobillas tenemos hierro y bobinas en el rotor, causando altas temperaturas y limitando sus prestaciones.
- Los que no tienen escobillas tienen hierro y bobinas en el estator donde la disipación del calor es más fácil.
- El diseño del rotor sin escobillas reduce su inercia y permite una respuesta dinámica más rápida.
- La vida de un rotor bobinado es más corta debido a las escobillas y el colector.

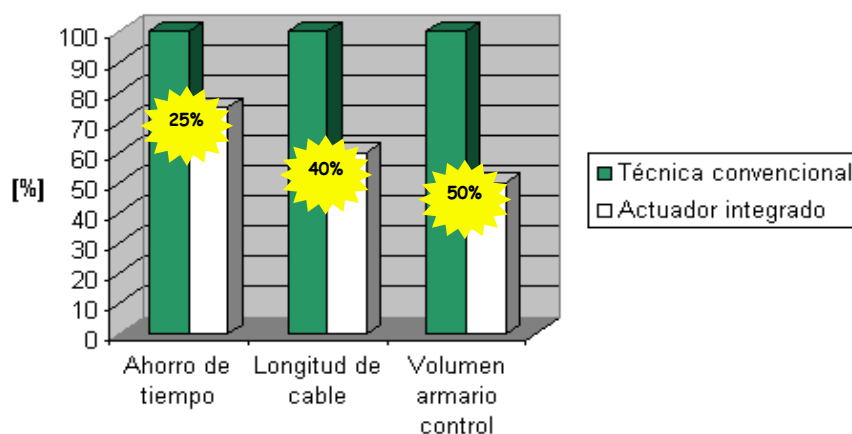
Veamos, por último y dentro de las tecnologías más recientes el actuador integrado.

El actuador integrado

¿Qué es un actuador integrado?

Es un conjunto de elementos que, como su mismo nombre indica, normalmente integra:

- Un motor que puede ser:
 - Brushless AC.
 - Brushless DC.
 - Paso a paso.
- Un actuador que integra la electrónica de control en el motor (el tipo de retroalimentación depende del motor que monte).
- Un reductor.
- 2 conectores para alimentación y comunicaciones.
- Un Controlador de posicionamiento.
- Normalmente operan conectados a un bus de campo.



Ejemplo: Aplicación con 5 ejes

Beneficios que aporta el actuador integrado

Principales recelos sobre los actuadores integrados y sus respuestas:

- El mercado, por lo general se resiste a esta tecnología:

En muchos casos el usuario y el personal de mantenimiento no se terminarán de creer las ventajas de los actuadores integrados.

En estos casos, si la aplicación es apropiada para estos actuadores, cuando se compruebe el ahorro que implica esta solución la decisión será clara.

- Dudas sobre la fiabilidad del aparato:

Estos actuadores son tan o más fiables que la solución motor + electrónica por separado.

La principal razón es que el motor y la electrónica de control han sido diseñados, fabricados y probado conjuntamente.

Si el actuador está bien dimensionado para la aplicación y la temperatura de trabajo, funcionará correctamente.

- Si falla una parte, hay que cambiar el conjunto completo:

La reposición de la electrónica y el motor garantiza una mayor fiabilidad de la máquina y minimiza posteriores paros de la misma.

- En general son más caros que motor y drive por separado:

En los rangos de potencia y en las aplicaciones para las cuales están pensados estos actuadores, se produce una mejora sustancial en el precio del equipo.

- Mayor coste del material de repuesto y de piezas de recambio:

Aunque es cierto que al fallar una de las partes, es necesaria la sustitución del todo el equipo, el cliente ha conseguido una reducción importante de costos en el total de la máquina.

- La electrónica no es adecuada para entornos agresivos:

Estos actuadores no son particularmente apropiados para entornos sucios y polvorientos o altas temperaturas.

El mayor problema es habitualmente la temperatura, que implica en esos casos sobredimensionar el actuador.

Aplicaciones tipo para los drives integrados:

- Ajuste de formato en máquinas de impresión.
- Ajuste de formato en máquinas de impresión flexográficas. Incluido el posicionamiento de los rodillos.
- Ajuste de formato en máquina herramienta.
- Válvula drive para hidráulica.
- Ajuste de formato en máquinas de empaquetado.
- Cambio de herramienta, modo automático, en máquinas – herramienta.
- Ajuste de formato en máquinas perforadoras.

- Ajuste de formato en máquinas paneladoras.
- Ajuste de formato para rectificadoras de una cara.
- Ajuste de formato en máquinas de corte de papel.
- Ajuste de formato en máquinas de encuadernación de libros.
- Ajustes en sistemas de fabricación de ventanas.
- Posicionamiento de la herramienta (máquinas para madera).
- Ajuste en máquinas de empaquetado para sobres.
- Ajuste de la profundidad de placa de circuito impreso.
- Aposicionamiento de cámaras.
- Ajuste de cabezal para soldadura por láser.
- Ajuste formato para alimentadores.
- Tecnología médica.
- Ajuste de registro en máquinas de impresión.
- Unidad de inyección de tinta en máquinas de impresión.
- Corte de papel / cambio de formato.

RESUMEN

En el presente apartado del curso, se ha pretendido iniciar al alumno en los conocimientos básicos de las máquinas eléctricas.

Se han expuesto los conceptos básicos de los motores de corriente continua y de corriente alterna, tanto en lo que se refiere a sus: Fundamentos, principios de funcionamiento, tipos y aplicaciones.

Y se han explicado los distintos sistemas de arranque, frenado, inversión de sentido de giro y control de los citados motores.

Se ha puesto especial interés en adecuar el nivel de información, tanto a las características del alumno al que va dirigido, como a la importancia que el tema tratado tiene en la industria actual.

En beneficio del alumno, como se ha citado anteriormente, se ha pretendido huir de grandes exposiciones teórico matemáticas, en bien de la mejor comprensión y se ha hecho mayor hincapié en las aplicaciones prácticas, desarrollas con sencillez y con la aportación de: Imágenes, gráficos y esquemas clarificadores.

La industria actual se basa en la aplicación mayoritaria de las máquinas aquí estudiadas, por lo que hemos puesto especial énfasis en tratar el tema del motor asíncrono de corriente alterna con rotor en jaula de ardilla o en cortocircuito, dado que su utilización, supera con creces a la de cualquier otro tipo, aunque las actuales tendencias, están concediendo un espacio, cada vez mayor, al servomotor o motor Brushless, bien entendido, que ambos compartirán, durante mucho tiempo, el espacio industrial.

BIBLIOGRAFÍA

Fóuillé, A.: *Electrotecnia para ingenieros. Máquinas eléctricas*, Aguilar S.A. Ediciones

Gaucheron, E.: *Cahier technique. N° 207. Les moteurs électriques. Pour mieux les piloter et les protéger*, Schneider Electric

Martín Romero, J.: *Electricidad*, Editorial Ramón Sopena, S.A.

Moeller & Werr: *Electrotecnia general y aplicada. Máquinas de cc y ca*, Editorial Labor, S.A.

Vidal Llenas, José: *Curso de Física (5ª Edición)*, Artes Gráficas Grijelmo S.A. *Biblioteca Técnica*, Schneider Electric

Enciclopedia Salvat de la Ciencia y de la Tecnología, Salvat Editores S.A.

Manual electrotécnico. Telesquemario. Telemecanique, Schneider Electric

Reference data for Radio Engineers, ITT