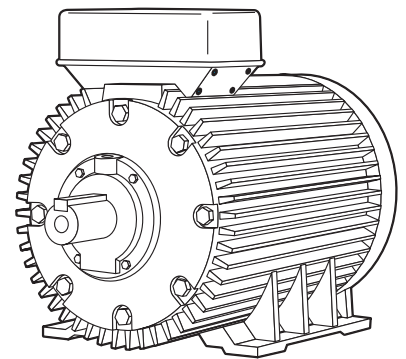


Capítulo 2

Las fábricas industriales y las instalaciones terciarias requieren una gran cantidad de maquinaria alimentada por distintas energías. No obstante, la energía eléctrica es preponderante, ya que, por razones técnicas y económicas, la mayoría de los dispositivos mecánicos que se emplean en los sectores industrial y terciario se accionan mediante motores eléctricos.



Los motores asíncronos trifásicos son los más utilizados, especialmente los motores de jaula. No obstante, los motores asíncronos de anillos o asíncronos monofásicos se adaptan perfectamente a ciertas aplicaciones. El uso de motores de corriente continua tiende a disminuir, salvo en el campo de los micromotores, en el que mantiene la supremacía. El control de motores asíncronos por equipos de contactores es perfectamente adecuado para una amplia gama de aplicaciones. Sin embargo, la progresión del uso de materiales electrónicos es constante: arrancadores ralentizadores progresivos para controlar el arranque y la parada, variadores reguladores de velocidad cuando es igualmente necesario regular la velocidad con precisión.

Motores eléctricos

Motores asíncronos trifásicos

Principio de funcionamiento	página	68
Composición	página	70
Consecuencias de la variación de tensión	página	71
Consecuencias de la variación de frecuencia	página	71

Arranque de los motores asíncronos trifásicos

Arranque directo	página	72
Arranque estrella-triángulo	página	73
Arranque de motores de devanados compartidos "part-winding"	página	75
Arranque estatístico por resistencias	página	76
Arranque por autotransformador	página	77
Arranque electrónico (soft starter)	página	78
Arranque rotórico por resistencias de los motores de anillos	página	79
Resumen de características de los distintos métodos de arranque	página	80

Regulación de velocidad de los motores asíncronos trifásicos

Velocidad de sincronización	página	81
Motores de jaula	página	82
Motores de anillos	página	82
Sistemas de variación de velocidad	página	83

Frenado eléctrico de los motores asíncronos trifásicos

Frenado por contracorriente	página	85
Frenado por inyección de corriente rectificada	página	86
Frenado por funcionamiento en hipersíncrono	página	87
Otros sistemas de frenado	página	87

Motores asíncronos monofásicos

Composición	página	88
Principio de funcionamiento	página	88
Modos de arranque	página	89

Motores de corriente continua

Composición	página	90
Principio de funcionamiento	página	90
Distintos tipos de motores de corriente continua	página	91

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

Motores asíncronos trifásicos

Los motores asíncronos trifásicos de jaula se encuentran entre los más utilizados para el accionamiento de máquinas. 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.

Principio de funcionamiento

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).

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.

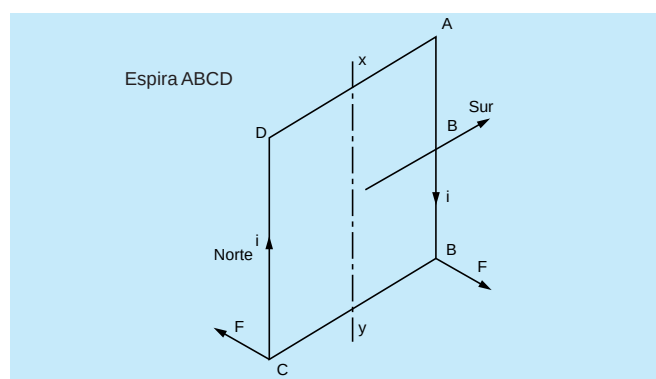
Según la ley de Lenz, el sentido de la corriente es tal que se opone por su acción electromagnética a su causa de origen. Cada uno de los dos conductores se somete por tanto a una fuerza F , en sentido opuesto a su desplazamiento relativo con respecto al campo inductor.

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.

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



Creación de una corriente inducida en una espira en cortocircuito

equivale a la mitad del valor del 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:

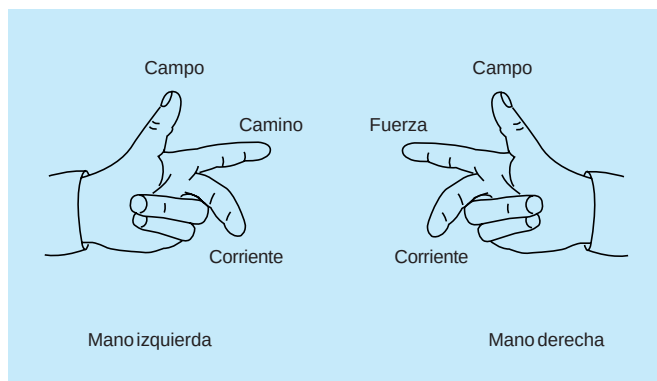
$$N_s = \frac{60 f}{p} \text{ en vueltas por minuto}$$

Deslizamiento

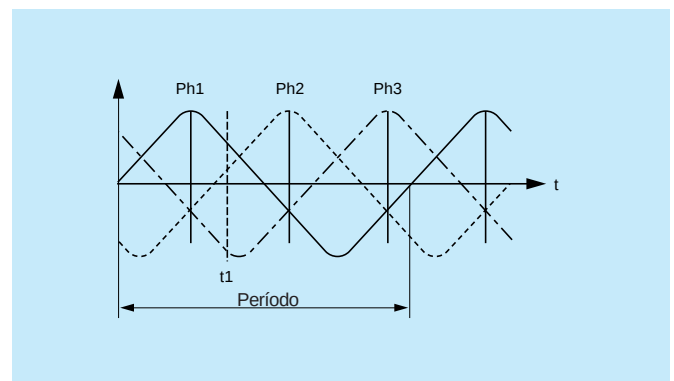
El par motor sólo puede existir cuando una corriente inducida circula por la espira. Para ello es necesario que exista un movimiento relativo entre los conductores activos y el campo giratorio. Por tanto, la espira debe girar a una velocidad inferior a la de sincronización, lo que explica que un motor eléctrico basado en el principio anteriormente descrito se denomine “motor asíncrono”. La diferencia entre la velocidad de sincronización y la de la espira se denomina “deslizamiento” y se expresa en %.

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \times 100$$

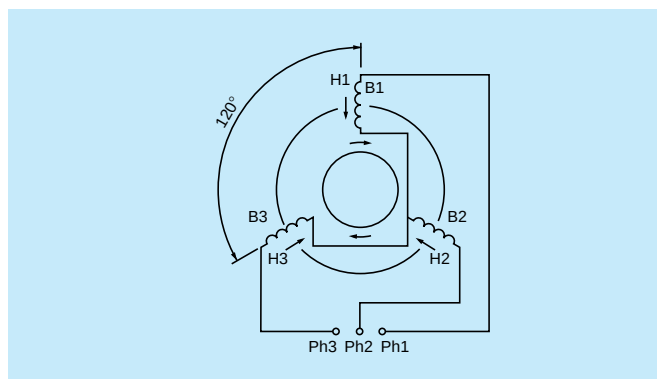
El deslizamiento en régimen estable varía en función de la carga del motor. Su fuerza disminuye o aumenta cuando el motor está subcargado o sobrecargado.



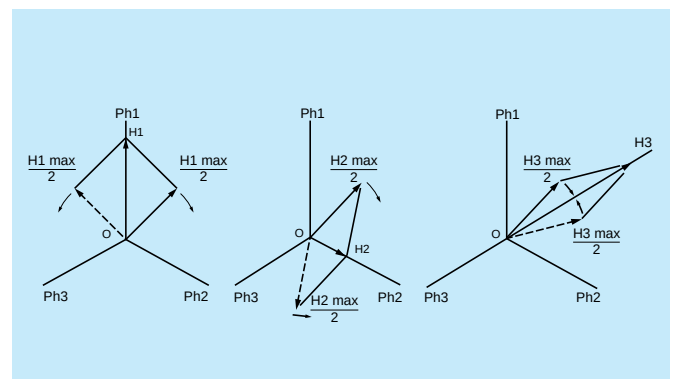
Reglas de los tres dedos



Red trifásica alterna



Principio de un motor asíncrono trifásico



Campos generados por las tres fases

Composición

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.

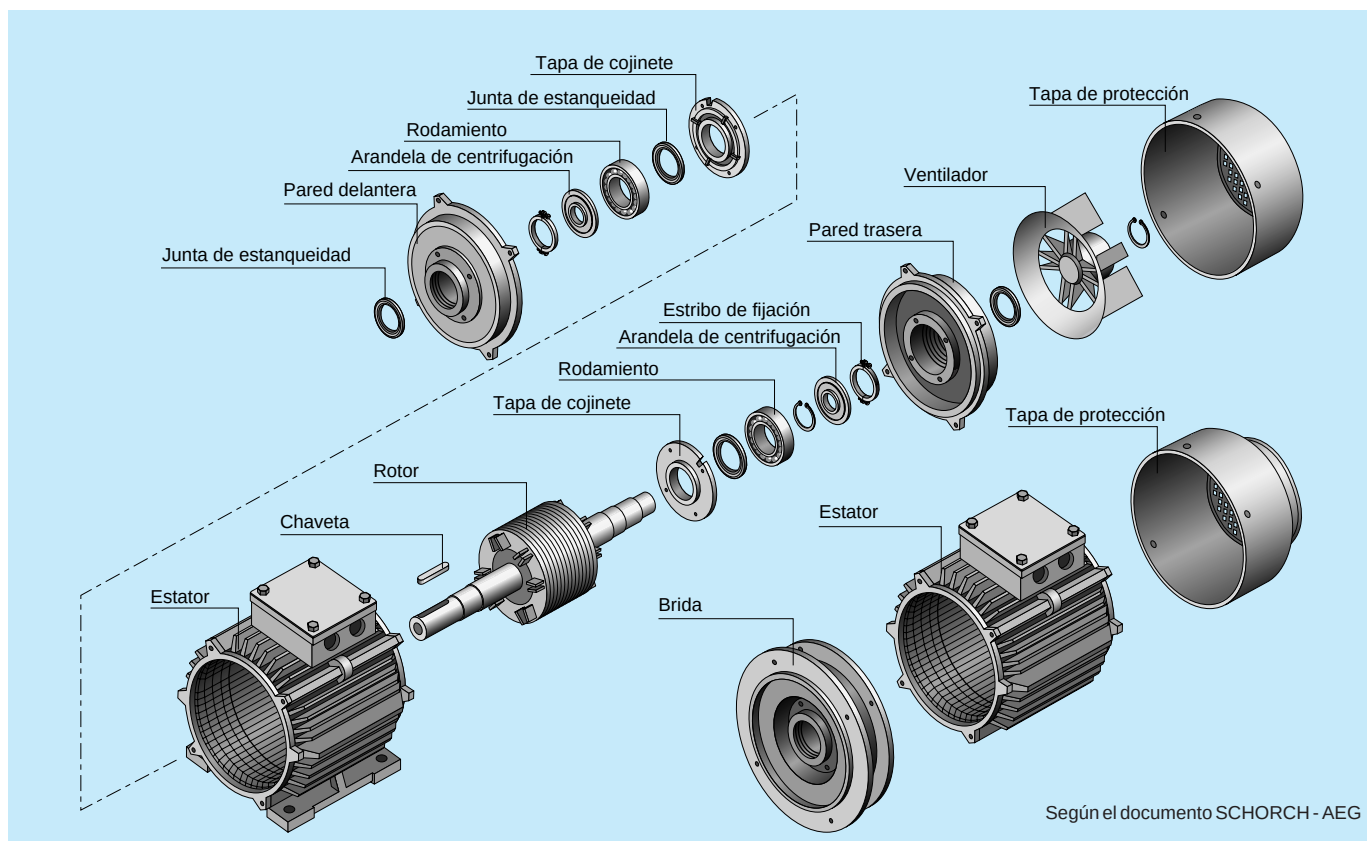
ROTOR DE JAULA

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.



Componentes de un motor asíncrono trifásico de jaula

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.

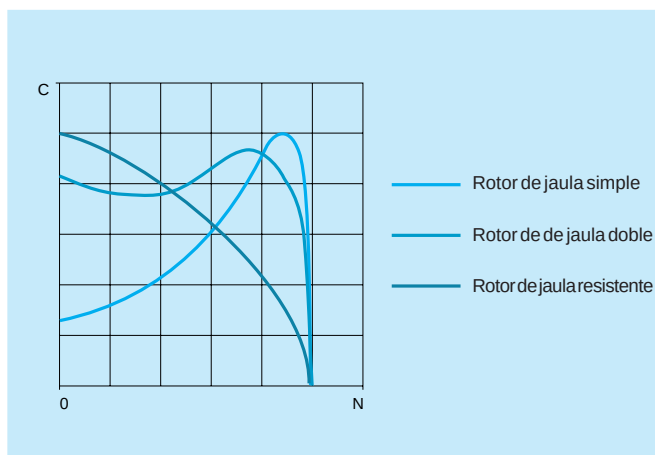
El rendimiento de los motores de jaula resistente es inferior, pero la variación de la velocidad puede obtenerse alterando únicamente la tensión. Por lo demás, su par de arranque es bueno.

EL ROTOR 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 (a Uno)

Consecuencias de la variación de tensión

Velocidad

Las variaciones de tensión no alteran la velocidad de sincronización.

Sin embargo, los aumentos de tensión implican la disminución del deslizamiento en el caso de un motor en carga. Este fenómeno queda limitado por la saturación de la máquina. Por el contrario, al disminuir la tensión de alimentación, el motor gira a menor velocidad.

Consecuencias de la variación de frecuencia

Par

En los motores asíncronos, el flujo es proporcional a la corriente para una frecuencia dada. La ley de Ohm aplicada a un motor da el siguiente resultado:

$$U = L\omega I + rI \quad \text{o bien} \quad I = \frac{U}{L\omega + r}$$

L = constante de fabricación

$\omega = 2\pi f$

r es omisible ante $L\omega$ cuando ω es distinto de 0

Por tanto, es posible escribir:

$$I = \frac{U}{2\pi Lf} = \frac{U}{kf}$$

Para obtener un flujo constante, y por tanto un I constante, es preciso que la relación U/f se mantenga constante.

Sin embargo, el valor del par de este tipo de motores para una frecuencia dada se obtiene mediante la fórmula:

$$C = k\phi I \quad \text{o bien} \quad kI^2$$

Por consiguiente, es posible trabajar a un par constante siempre que sea posible aumentar U hasta la tensión nominal.

Por lo demás, siempre es posible aumentar la frecuencia, pero, al disminuir la corriente, el par disminuye igualmente.

Corriente de arranque

Varía proporcionalmente a la tensión de alimentación.

Cuando ésta es superior, aumenta la corriente absorbida durante el arranque.

Con un convertidor de frecuencia, la corriente de arranque es débil (entre 1 y 1,5 veces la corriente nominal) con respecto a las soluciones clásicas (de 6 a 8 veces la corriente nominal), al tiempo que se desarrolla un par de arranque importante.

Velocidad

La velocidad de sincronización de los motores asíncronos es proporcional a la frecuencia. Esta propiedad suele utilizarse para funcionar a muy alta velocidad los motores especialmente diseñados para una alimentación, por ejemplo, a 400 Hz (rectificadoras, aparatos de laboratorio o quirúrgicos, etc.). También es posible obtener una velocidad variable mediante la regulación de la frecuencia, por ejemplo, de 6 a 50 Hz (rodillos transportadores, aparatos elevadores, etc.).

Arranque de los motores asíncronos trifásicos

Durante la puesta en tensión de un motor, la corriente solicitada es considerable y puede provocar una caída de tensión que afecte al funcionamiento de los receptores, especialmente en caso de insuficiencia de la sección de la línea de alimentación. En ocasiones, la caída puede llegar a ser perceptible en los aparatos de alumbrado.

Para poner remedio a estos inconvenientes, ciertos reglamentos sectoriales prohíben el uso de motores de arranque directo que superen cierta potencia. Otros se limitan a imponer la relación entre la corriente de arranque y la nominal en base a la potencia de los motores.

Los motores de jaula son los únicos que pueden acoplarse directamente a la red por medio de un equipo simple.

Tan sólo las extremidades de los devanados del estator sobresalen de la placa de bornas. Dado que el fabricante determina de manera definitiva las características del rotor, los distintos procesos de arranque consisten principalmente en hacer variar la tensión en las bornas del estátor. En este tipo de motores, cuya frecuencia es constante, la reducción de la punta de corriente conlleva de manera automática una fuerte reducción del par.

Arranque directo

Se trata del modo de arranque más sencillo en el que el estator se acopla directamente a la red. El motor se basa en sus características naturales para arrancar.

En el momento de la puesta bajo tensión, el motor actúa como un transformador cuyo secundario, formado por la jaula muy poco resistente del rotor, está en cortocircuito. La corriente inducida en el rotor es importante. La corriente primaria y la secundaria son prácticamente proporcionales. Por tanto, se obtiene una punta de corriente importante en la red:

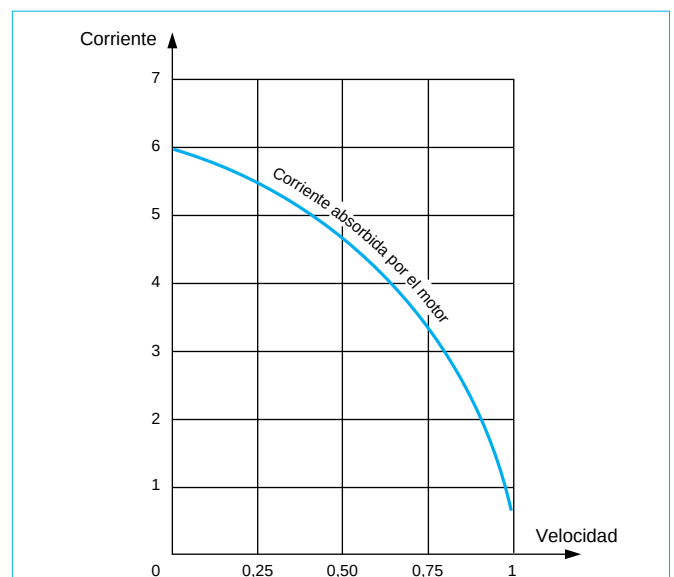
$I_{\text{arranque}} = 5 \text{ a } 8 I_{\text{nominal}}$

El par de arranque medio es:

$C_{\text{arranque}} = 0,5 \text{ a } 1,5 C_{\text{nominal}}$

A pesar de las ventajas que conlleva (sencillez del equipo, elevado par de arranque, arranque rápido, bajo coste), sólo es posible utilizar el arranque directo en los siguientes casos:

- la potencia del motor es débil con respecto a la de la red, para limitar las perturbaciones que provoca la corriente solicitada,
 - la máquina accionada no requiere un aumento progresivo de velocidad y dispone de un dispositivo mecánico (por ejemplo, un reductor) que impide el arranque brusco,
 - el par de arranque debe ser elevado.
- Por el contrario, siempre que:
- la caída de tensión provocada por la corriente solicitada pueda perturbar el buen funcionamiento de otros aparatos conectados a la misma línea,
 - la máquina accionada no pueda admitir sacudidas mecánicas,
 - la seguridad o la comodidad de los usuarios se vea comprometida (por ejemplo, en el caso de las escaleras mecánicas),
- será imprescindible recurrir a una artimaña para disminuir la corriente solicitada o el par de arranque. En estos casos, el medio más utilizado consiste en arrancar el motor bajo tensión reducida.

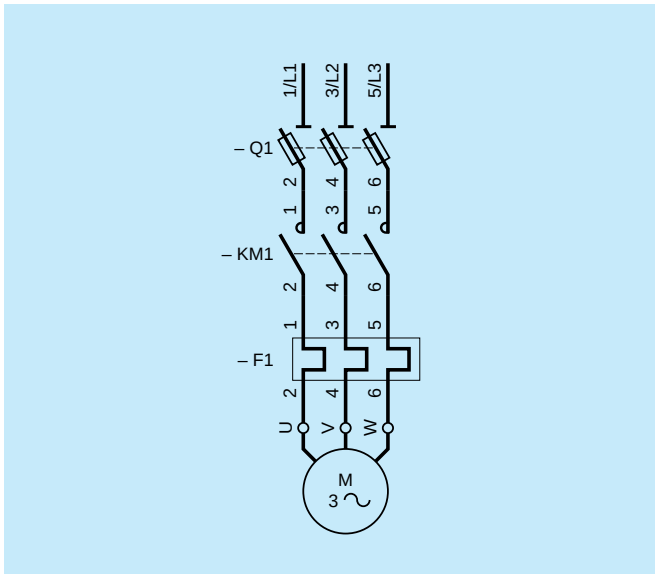


Curva de corriente/velocidad del arranque directo

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 divide por $\sqrt{3}$, la corriente se divide aproximadamente por $\sqrt{3}$ y el par se divide por 3.



Arranque directo

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 V = 660 V / $\sqrt{3}$).

La punta de corriente durante el arranque se divide por 3:

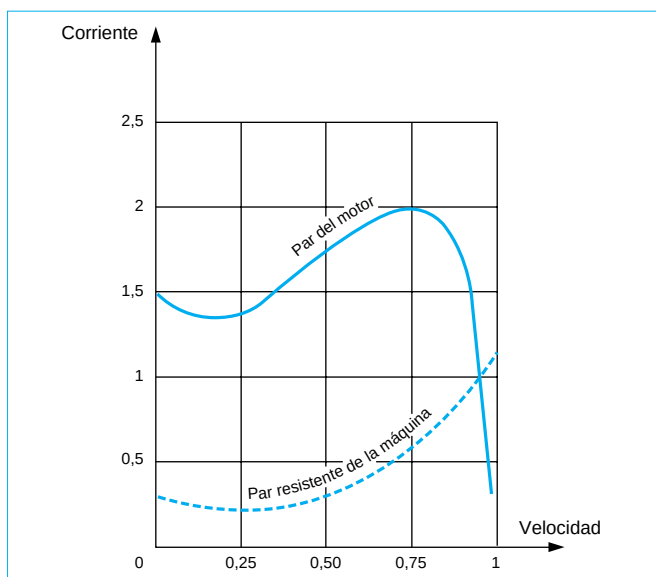
$$I_d = 1,5 \text{ a } 2,6 I_n$$

Un motor de 380 V/660 V acoplado en estrella a su tensión nominal de 660 V absorbe una corriente $\sqrt{3}$ veces menor que si se acopla en triángulo a 380 V. Dado que el acoplamiento en estrella se realiza a 380 V, la corriente se divide nuevamente por $\sqrt{3}$. Por tanto, se divide por un total de 3.

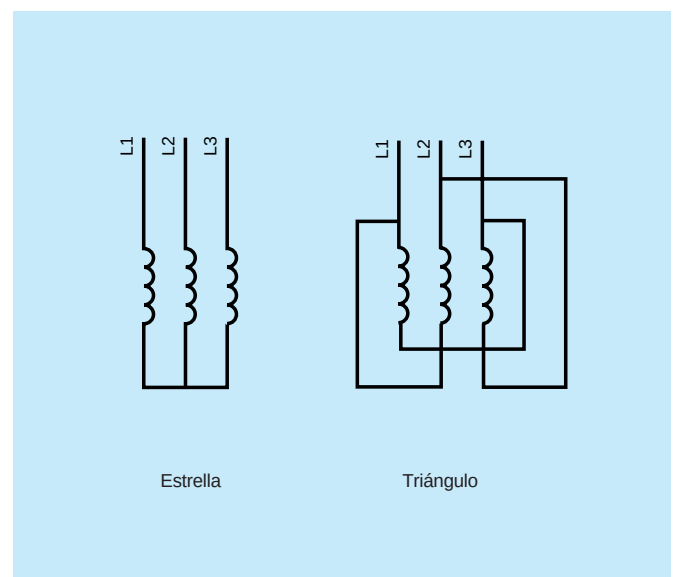
El par de arranque se divide igualmente por 3, ya que es proporcional al cuadrado de la tensión de alimentación:

$$C_d = 0,2 \text{ a } 0,5 C_n$$

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.



Curva de corriente/velocidad del arranque directo



Acoplamiento de los devanados del motor

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_{cm} del motor.

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_{cm} 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.

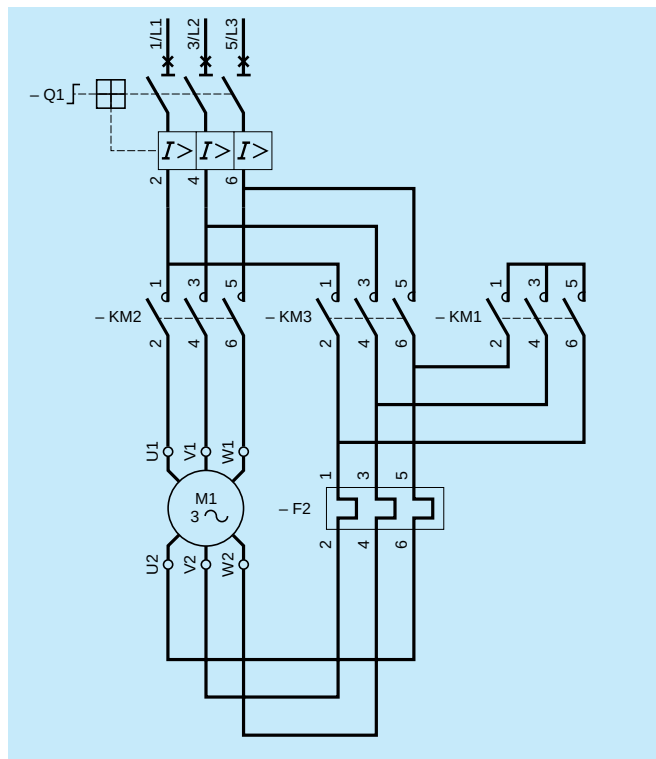
- arranque en 3 tiempos: estrella-triángulo + resistencia-triángulo.

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.

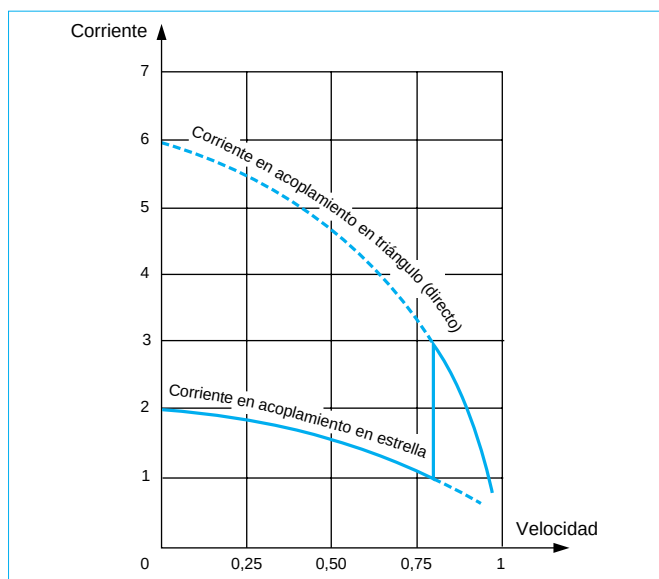
- arranque en estrella-triángulo + resistencia-triángulo sin corte.

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.

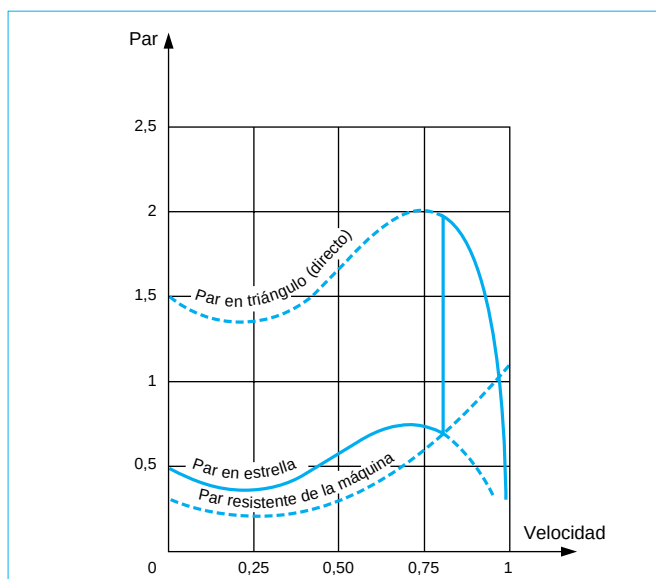
El uso de estas variantes conlleva la instalación de componentes adicionales y el consiguiente aumento del coste total. En muchos casos, el uso de un arrancador estático de tipo Altistart es una solución preferible.



Arranque estrella-triángulo



Curva de corriente/velocidad del arranque estrella-triángulo



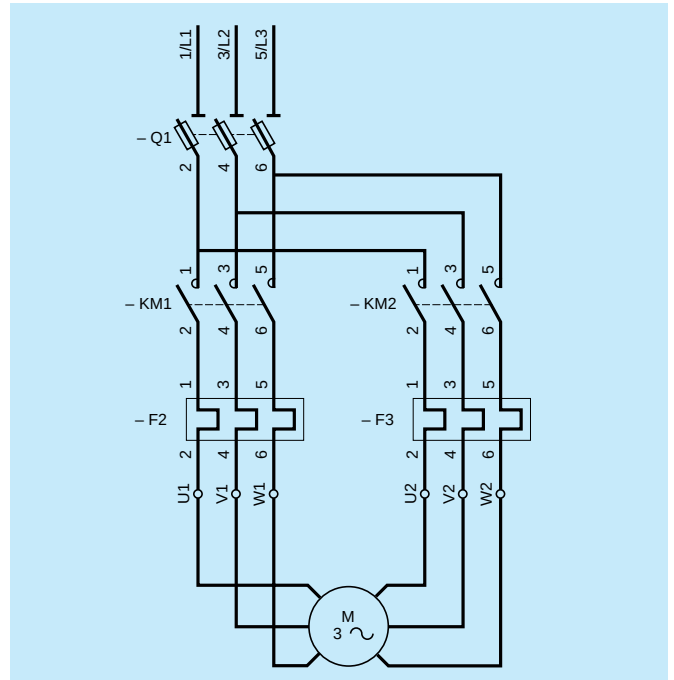
Curva de par/velocidad del arranque estrella-triángulo

Arranque de motores de devanados partidos "part-winding"

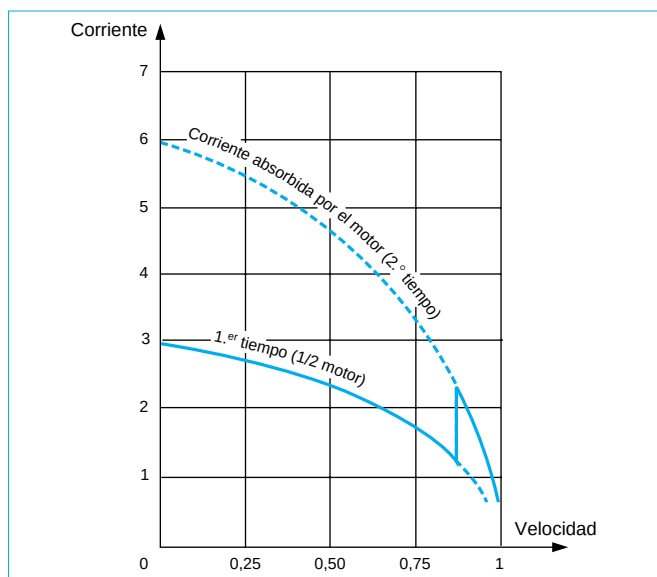
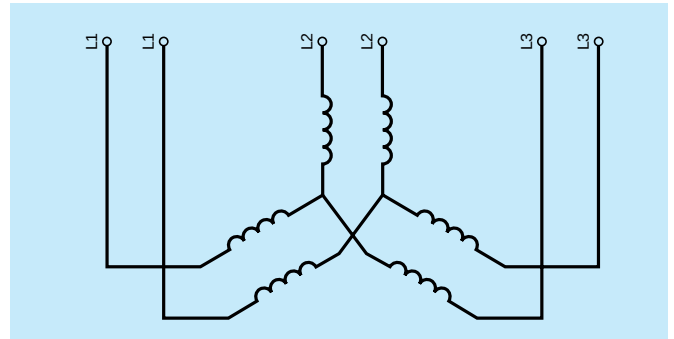
Este tipo de motor está dotado de un devanado estático desdoblado en dos devanados paralelos con seis o doce bornas de salida. Equivale a dos "medios motores" de igual potencia.

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.

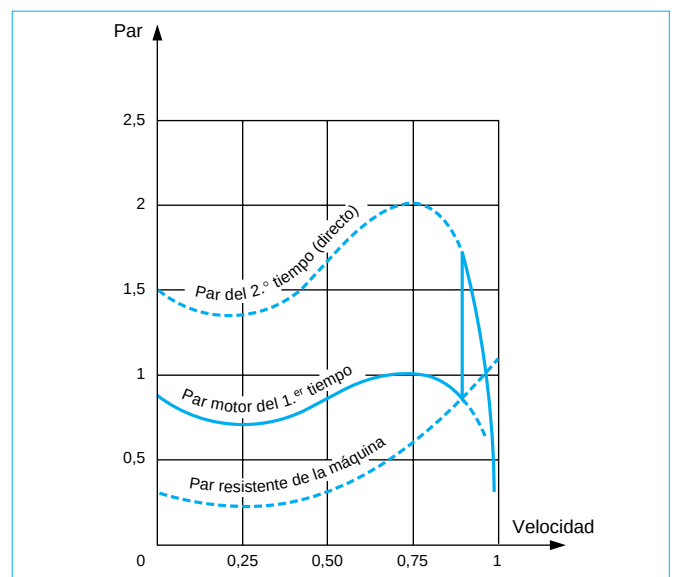
Al finalizar el arranque, el segundo devanado se acopla a la red. En ese momento, la punta de corriente es débil y de corta duración, ya que el motor no se ha separado de la red de alimentación y su deslizamiento ha pasado a ser débil. Este sistema, poco utilizado en Europa, es muy frecuente en el mercado 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"

Arranque estatórico por resistencias

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:

$$I_d = 4,5 I_n$$

$$C_d = 0,75 C_n$$

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.

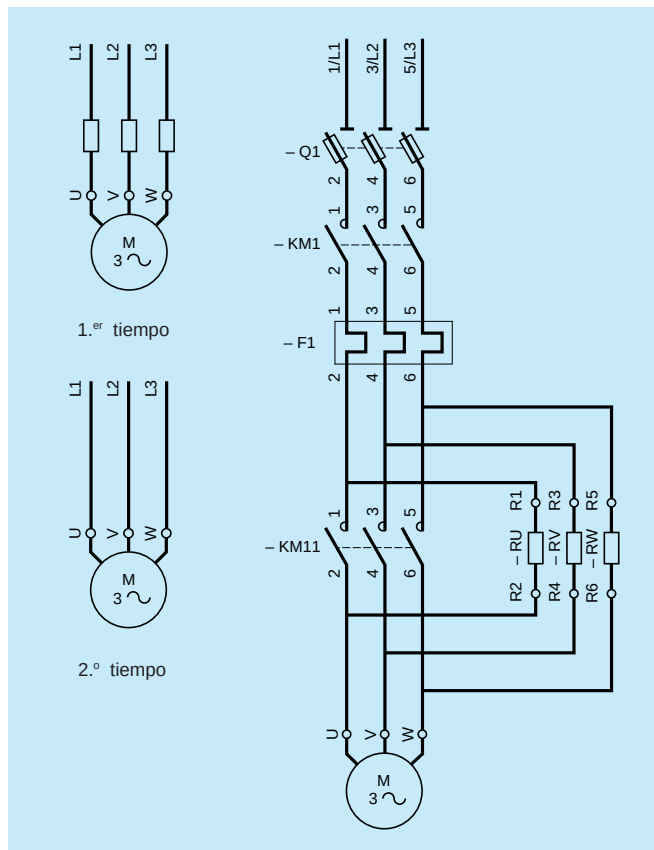
Dado que el par es proporcional al cuadrado de la tensión de las bornas del motor, aumenta más rápidamente que en el caso del arranque estrella-triángulo, en el que la tensión permanece invariable mientras dura el acoplamiento en estrella.

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

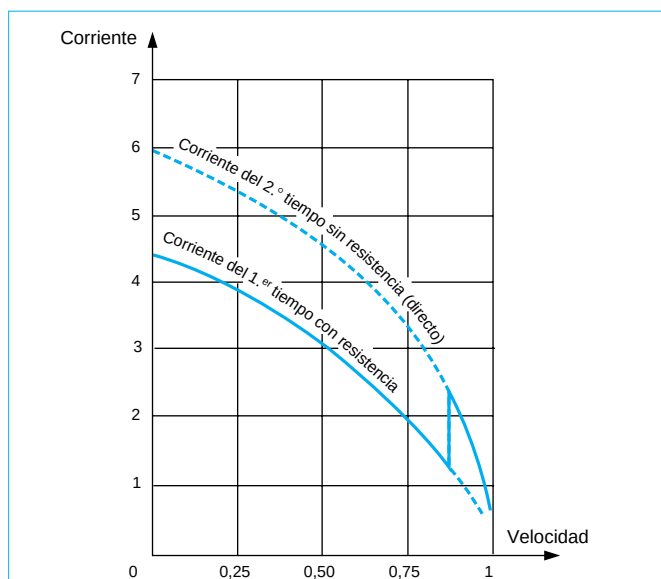
Su inconveniente consiste en que la punta de corriente es relativamente importante durante el arranque. Sería posible

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.

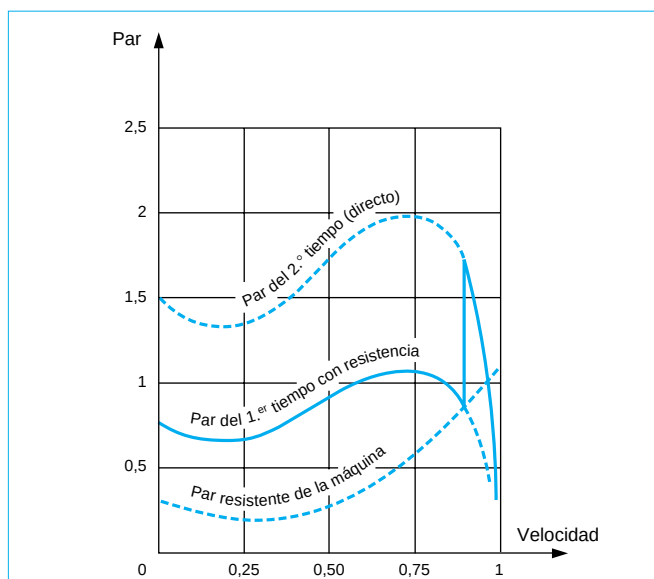
Por el contrario, la eliminación de la resistencia al finalizar el arranque se lleva a cabo sin interrumpir la alimentación del motor y, por tanto, sin fenómenos transitorios.



Arranque estatórico por resistencias



Curva de corriente/velocidad del arranque estatórico por resistencias



Curva de par/velocidad del arranque estatórico por resistencias

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:

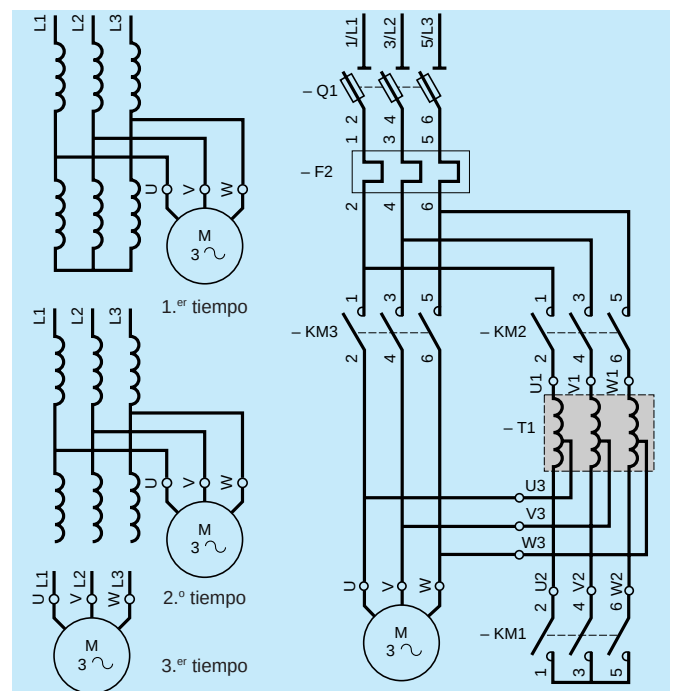
$$I_d = 1,7 \text{ a } 4 I_n$$

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

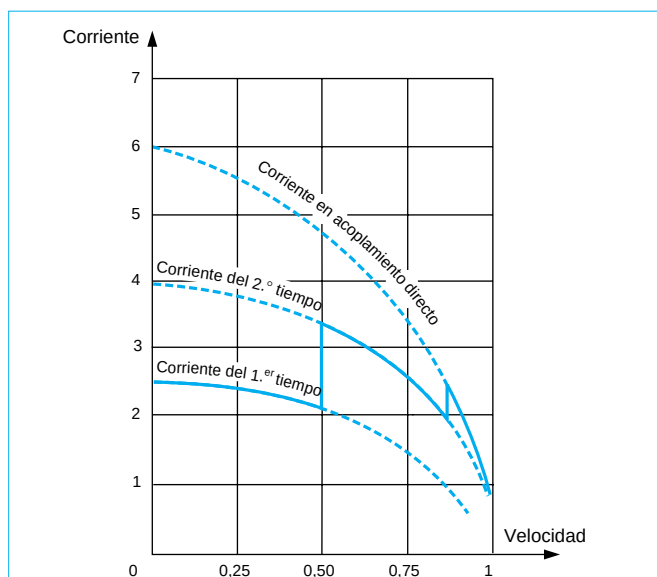
El arranque se lleva a cabo sin interrupción de corriente en el motor, lo que evita que se produzcan fenómenos transitorios. No obstante, si no se toman ciertas precauciones pueden aparecer fenómenos transitorios de igual naturaleza durante el acoplamiento a plena tensión. De hecho, el valor de la inductancia 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.

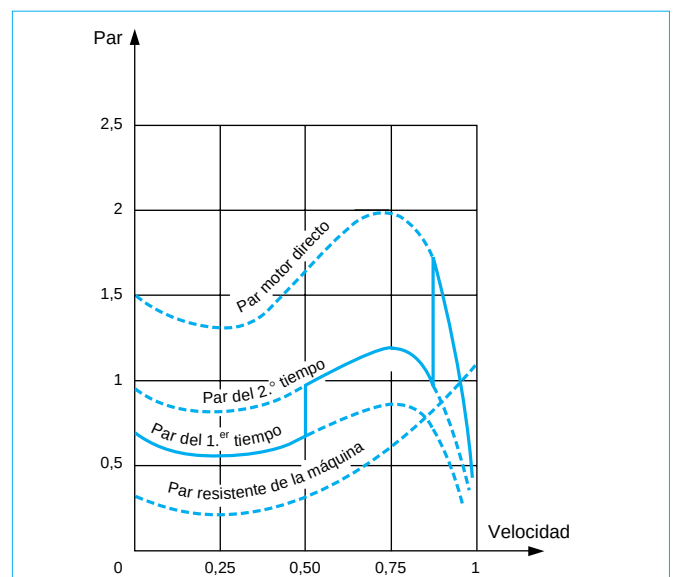
El entrehierro aumenta la corriente magnetizante del autotransformador. Dicha corriente aumenta la corriente solicitada en la red durante el primer tiempo del arranque. Este modo de arranque suele utilizarse en los motores con potencia superior a 100 kW. Sin embargo, el precio de los equipos es relativamente alto debido al elevado coste del autotransformador.



Arranque por autotransformador



Curva de corriente/velocidad del arranque por autotransformador



Curva de par/velocidad del arranque por autotransformador

Arranque electrónico (soft starter)

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 como el Altistart 3 es un graduador de 6 tiristores que se utiliza para arrancar y parar de manera controlada los motores trifásicos de jaula. Garantiza:

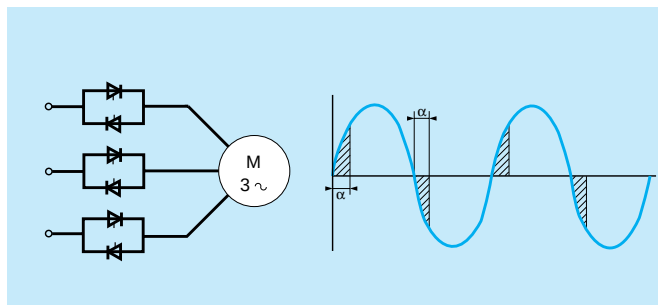
- el control de las características de funcionamiento, principalmente durante los períodos de arranque y parada,
- la protección térmica del motor y del arrancador,
- la protección mecánica de la máquina accionada, mediante la supresión de las sacudidas de par y la reducción de la corriente solicitada.

La corriente (I_{ATS} en el ejemplo del lateral) 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.

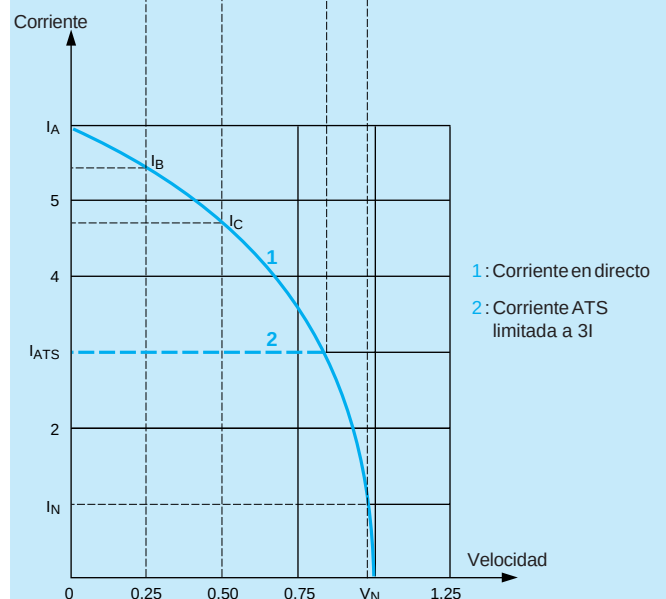
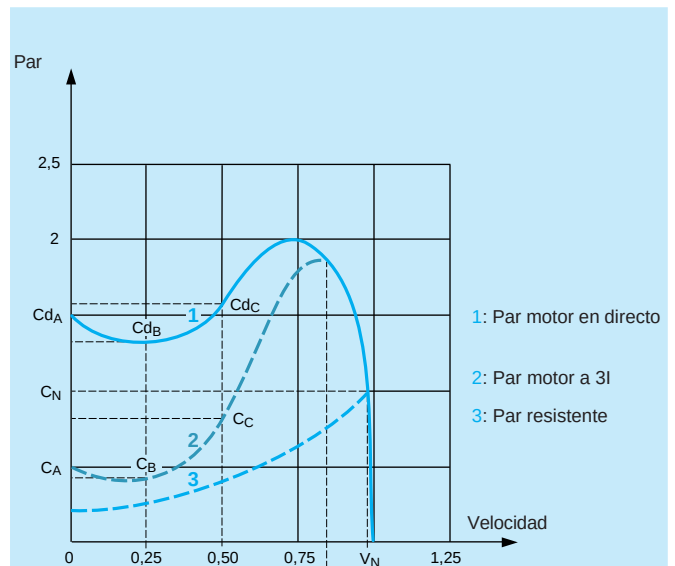
Permite arrancar todo tipo de motores asíncronos. Puede cortocircuitarse para arrancar por medio de un contactor y mantener al mismo tiempo el dominio del circuito de control.

A todo ello hay que añadir la posibilidad de:

- deceleración progresiva,
- parada frenada.



Arrancador ralentizador Altistart



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:

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

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

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

Curvas de corriente/velocidad y par/velocidad del arranque electrónico

Arranque rotórico por resistencias de los motores de anillos

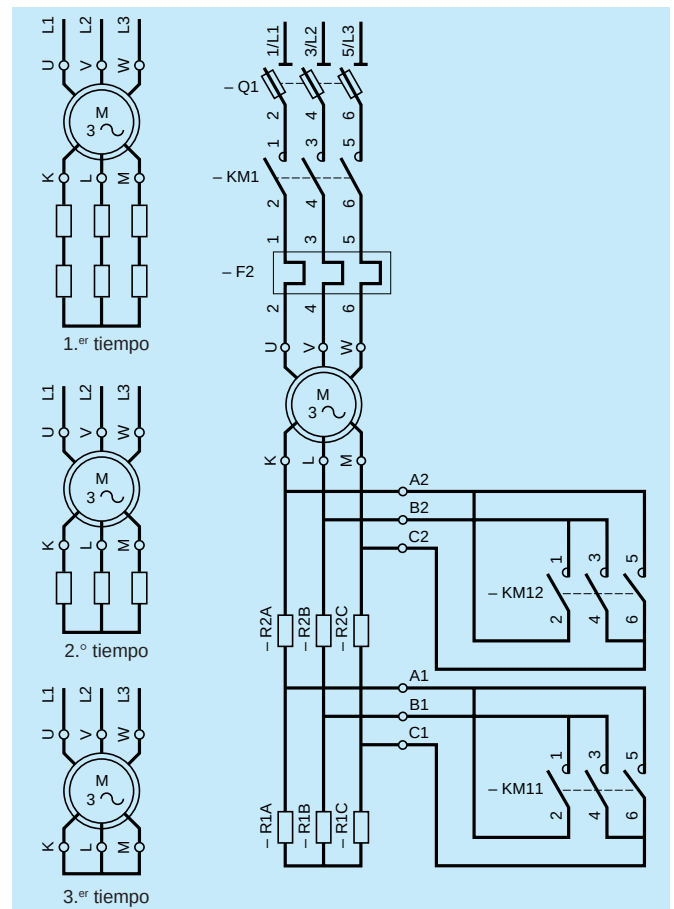
Un motor de anillos no puede arrancar en directo (devanados rotóricos cortocircuitados) sin provocar puntas de corriente inadmisibles. Es necesario insertar en el circuito rotórico resistencias que se cortocircuiten progresivamente, al tiempo que se alimenta el estator a toda la tensión de red.

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.

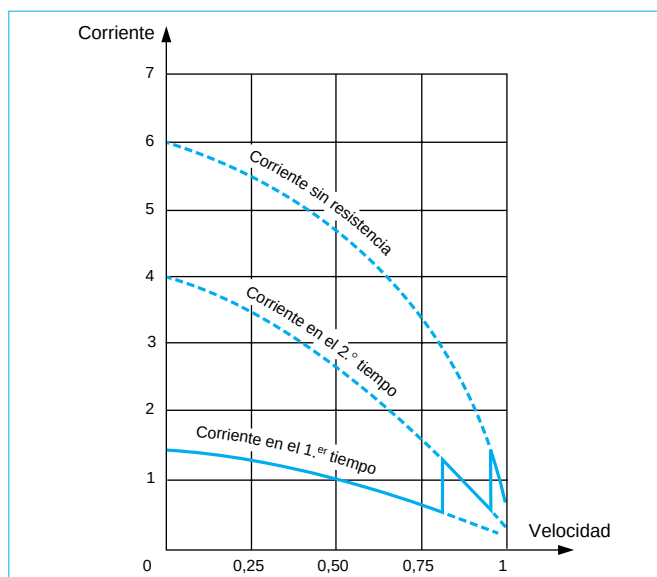
La corriente absorbida es prácticamente proporcional al par que se suministra. Como máximo, es ligeramente superior a este valor teórico.

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.

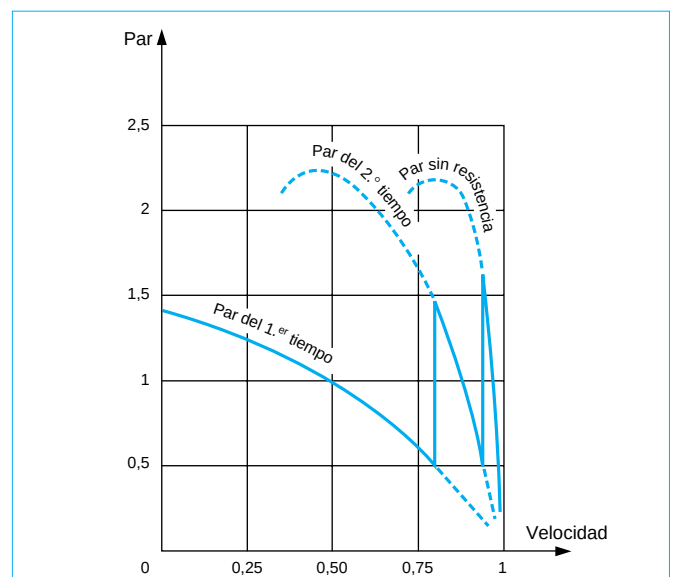
Por lo demás, este tipo de arranque es sumamente flexible, ya que resulta fácil adaptar el número y el aspecto de las curvas que representan los tiempos sucesivos a los requisitos mecánicos o eléctricos (par resistente, valor de aceleración, punta máxima de corriente, etc.).



Arranque rotórico por resistencias



Curva de corriente/velocidad del arranque rotórico por resistencias



Curva de par/velocidad del arranque rotórico por resistencias

Resumen de características de los distintos métodos de arranque

	Motores de jaula				Motores de anillos		
	Arranque directo	Arranque partwinding	Arranque estrella-triángulo	Arranque estático	Arranque por autotransformador	Arrancador progresivo	Arranque rotórico
Corriente de arranque	100%	50%	33%	70%	40 / 65 / 80%	Regulable de 25 a 75% (potenciómetro)	70%
Sobrecarga de la línea	4 a 8 In	2 a 4 In	1,3 a 2,6 In	4,5 In	1,7 a 4 In		< 2,5 In
Par en % de Cd	100%	50%	33%	50%	40 / 65 / 80 %	Regulable de 10 a 70%	
Par inicial de arranque	0,6 a 1,5 Cn	0,3 a 0,75 Cn	0,2 a 0,5 Cn	0,6 a 0,85 Cn	0,4 a 0,85 Cn	Regulable de 0,1 a 0,7 Cn	< 2,5 Cn
Mando	Todo o nada	Todo o nada	Todo o nada	1 posición fija	3 posiciones fijas	Progresivo	De 1 a 5 posiciones
Motor de jaula económico y robusto							
Ventajas	● Arrancador simple ● Económico ● Par de arranque importante	● Simple ● Par de arranque más elevado que en estrella-triángulo ● Sin corte de alimentación durante el arranque	● Arrancador económico ● Buena relación par/corriente	● Posibilidad de ajuste de los valores en el arranque ● Sin corte de alimentación durante el arranque ● Fuerte reducción de las puntas de corriente transitorias	● Buena relación par/corriente ● Posibilidad de ajuste de los valores en el arranque ● Sin corte de alimentación durante el arranque	● Regulable durante la puesta en servicio ● Dimensiones reducidas ● Estático ● Adaptable a cualquier ciclo	● Excelente relación par/corriente ● Posibilidad de ajuste de los valores en el arranque ● Sin corte de alimentación durante el arranque
Inconvenientes	● Punta de corriente muy importante ● Arranque brutal	● Sin posibilidad de ajuste ● Motor especial ● Red especial	● Par de arranque débil ● Sin posibilidad de ajuste ● Corte de alimentación en el cambio de acoplamiento y fenómenos transitorios ● Motor de 6 bornas	● Débil reducción de la punta de arranque ● Necesidad de resistencias voluminosas	● Necesidad de un autotransformador costoso ● Implica riesgos en redes con perturbaciones	● Genera perturbaciones	● Motor de anillos más costoso ● Necesita resistencias
Tiempos de arranque	2 a 3 segundos	3 a 6 segundos	3 a 7 segundos	7 a 12 segundos	7 a 12 segundos	Regulable de 1 a 60 segundos	● 3 tiempos 2,5 s ● 4 y 5 tiempos 5 s
Aplicaciones habituales	● Pequeñas máquinas, aunque arranquen a plena carga	● Máquinas que arrancan en vacío o a poca carga (compresores para grupos de climatización)	● Máquinas que arrancan en vacío ● Ventiladores y bombas centrífugas de poca potencia	● Máquinas de elevada potencia sin problemas especiales de par ni de corriente en el arranque	● Máquinas de elevada potencia o inercia, en casos en los que la reducción de la punta de corriente sea un criterio importante	● Bombas, ventiladores, compresores, transportadores	● Máquinas de arranque en carga, de arranque progresivo, etc.

Cómo utilizar la tabla

- Instalación atendida a baja tensión por la red de distribución.
Respete la normativa del sector que establezca la potencia límite a la que es posible arrancar un motor sin reducción de la punta de corriente.
- Instalación atendida por un transformador particular.
Determine cuál es la punta de arranque máxima admisible que no provoca una disyunción del lado de alta tensión del transformador.
Compare la punta de arranque en directo del motor

elegido en función de uno de los criterios anteriores.

- La punta es aceptable.
Verifique que la caída de tensión en línea no sea muy importante; en caso contrario:
 - refuerce la línea o
 - elija otro método de arranque.
- La punta debe reducirse o la caída de tensión es muy importante:
 - elija otro método de arranque,
 - verifique si se obtiene un par suficiente en estas condiciones.

Regulación de velocidad de los motores asíncronos trifásicos

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.

Resumen de características de los distintos métodos de arranque

	Motores de jaula				Motores de anillos		
	Arranque directo	Arranque partwinding	Arranque estrella-triángulo	Arranque estático	Arranque por autotransformador	Arrancador progresivo	Arranque rotórico
Corriente de arranque	100%	50%	33%	70%	40 / 65 / 80%	Regulable de 25 a 75% (potenciómetro)	70%
Sobrecarga de la línea	4 a 8 In	2 a 4 In	1,3 a 2,6 In	4,5 In	1,7 a 4 In		< 2,5 In
Par en % de Cd	100%	50%	33%	50%	40 / 65 / 80 %	Regulable de 10 a 70%	
Par inicial de arranque	0,6 a 1,5 Cn	0,3 a 0,75 Cn	0,2 a 0,5 Cn	0,6 a 0,85 Cn	0,4 a 0,85 Cn	Regulable de 0,1 a 0,7 Cn	< 2,5 Cn
Mando	Todo o nada	Todo o nada	Todo o nada	1 posición fija	3 posiciones fijas	Progresivo	De 1 a 5 posiciones
Motor de jaula económico y robusto							
Ventajas	● Arrancador simple ● Económico ● Par de arranque importante	● Simple ● Par de arranque más elevado que en estrella-triángulo ● Sin corte de alimentación durante el arranque	● Arrancador económico ● Buena relación par/corriente	● Posibilidad de ajuste de los valores en el arranque ● Sin corte de alimentación durante el arranque ● Fuerte reducción de las puntas de corriente transitorias	● Buena relación par/corriente ● Posibilidad de ajuste de los valores en el arranque ● Sin corte de alimentación durante el arranque	● Regulable durante la puesta en servicio ● Dimensiones reducidas ● Estático ● Adaptable a cualquier ciclo	● Excelente relación par/corriente ● Posibilidad de ajuste de los valores en el arranque ● Sin corte de alimentación durante el arranque
Inconvenientes	● Punta de corriente muy importante ● Arranque brutal	● Sin posibilidad de ajuste ● Motor especial ● Red especial	● Par de arranque débil ● Sin posibilidad de ajuste ● Corte de alimentación en el cambio de acoplamiento y fenómenos transitorios ● Motor de 6 bornas	● Débil reducción de la punta de arranque ● Necesidad de resistencias voluminosas	● Necesidad de un autotransformador costoso ● Implica riesgos en redes con perturbaciones	● Genera perturbaciones	● Motor de anillos más costoso ● Necesita resistencias
Tiempos de arranque	2 a 3 segundos	3 a 6 segundos	3 a 7 segundos	7 a 12 segundos	7 a 12 segundos	Regulable de 1 a 60 segundos	● 3 tiempos 2,5 s ● 4 y 5 tiempos 5 s
Aplicaciones habituales	● Pequeñas máquinas, aunque arranquen a plena carga	● Máquinas que arrancan en vacío o a poca carga (compresores para grupos de climatización)	● Máquinas que arrancan en vacío ● Ventiladores y bombas centrífugas de poca potencia	● Máquinas de elevada potencia sin problemas especiales de par ni de corriente en el arranque	● Máquinas de elevada potencia o inercia, en casos en los que la reducción de la punta de corriente sea un criterio importante	● Bombas, ventiladores, compresores, transportadores	● Máquinas de arranque en carga, de arranque progresivo, etc.

Cómo utilizar la tabla

- Instalación atendida a baja tensión por la red de distribución.
Respete la normativa del sector que establezca la potencia límite a la que es posible arrancar un motor sin reducción de la punta de corriente.
- Instalación atendida por un transformador particular.
Determine cuál es la punta de arranque máxima admisible que no provoca una disyunción del lado de alta tensión del transformador.
Compare la punta de arranque en directo del motor

elegido en función de uno de los criterios anteriores.

- La punta es aceptable.
Verifique que la caída de tensión en línea no sea muy importante; en caso contrario:
 - refuerce la línea o
 - elija otro método de arranque.
- La punta debe reducirse o la caída de tensión es muy importante:
 - elija otro método de arranque,
 - verifique si se obtiene un par suficiente en estas condiciones.

Regulación de velocidad de los motores asíncronos trifásicos

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.

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. 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.

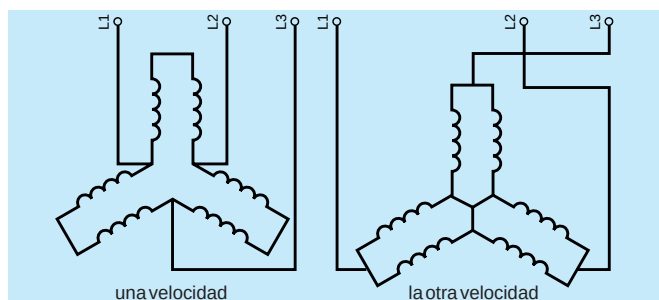
En ciertos casos, si las condiciones de uso lo requieren y el motor lo permite, el dispositivo de arranque pasa automáticamente a baja velocidad antes de activar la alta velocidad o antes de la parada.

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 BV deben soportar las restricciones mecánicas y eléctricas derivadas del funcionamiento del motor a 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.



Motor de acoplamiento de polos

Motores de anillos

Regulación de velocidad por deslizamiento

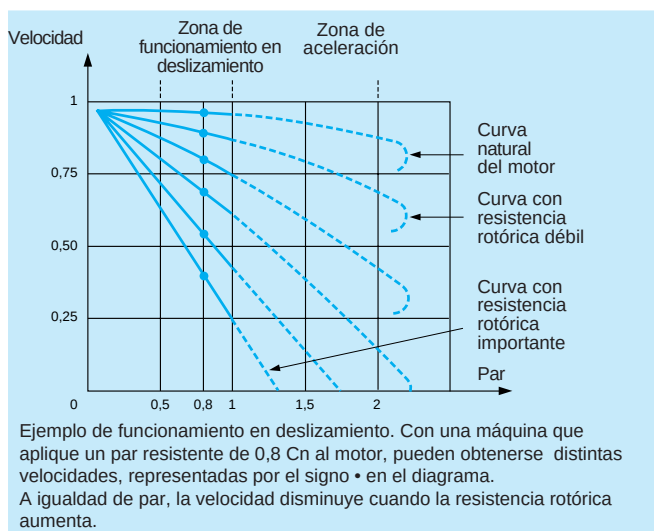
La conexión de una resistencia permanente a las bornas de un motor de anillos reduce su velocidad de manera proporcional al valor de la resistencia. Se trata de una solución sencilla para alterar la velocidad.

Las resistencias "de deslizamiento" pueden cortocircuitarse en varias posiciones para obtener la regulación discontinua de la velocidad o la aceleración progresiva y el arranque completo del motor. Deben soportar la duración del funcionamiento, especialmente cuando su función consiste en hacer variar la velocidad. Por este motivo, su volumen al igual que su coste, puede ser considerable.

Este proceso es sumamente simple y se utiliza con frecuencia.

No obstante, conlleva dos inconvenientes importantes:

- durante la marcha a velocidad reducida, gran parte de la energía tomada de la red se disipa y se pierde en las resistencias,
- la velocidad que se obtiene no es independiente de la carga pero varía con el par resistente que aplica la máquina al eje del motor. Para una resistencia dada, el deslizamiento es proporcional al par. Por ejemplo, la bajada de velocidad que se obtiene mediante una resistencia puede ser del 50% a plena carga y sólo del 25% a media carga, mientras que la velocidad en vacío permanece prácticamente invariable. Si un operador vigila permanentemente la máquina, puede modificar bajo pedido el valor de la resistencia para establecer la velocidad de una zona determinada. Esta práctica funciona en el caso de los pares relativamente importantes, pero la regulación resulta prácticamente imposible en el caso de los pares débiles. De hecho, si se inserta una resistencia muy fuerte para obtener un punto "velocidad débil a par débil", la menor variación del par resistente hace aumentar la velocidad de cero a cerca del 100%. Esta característica es muy inestable. En el caso de las máquinas con variación particular del par resistente en función de la velocidad, el ajuste puede ser igualmente imposible.



Curva de velocidad/par con resistencias "de deslizamiento"

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 MLI (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 inferior).

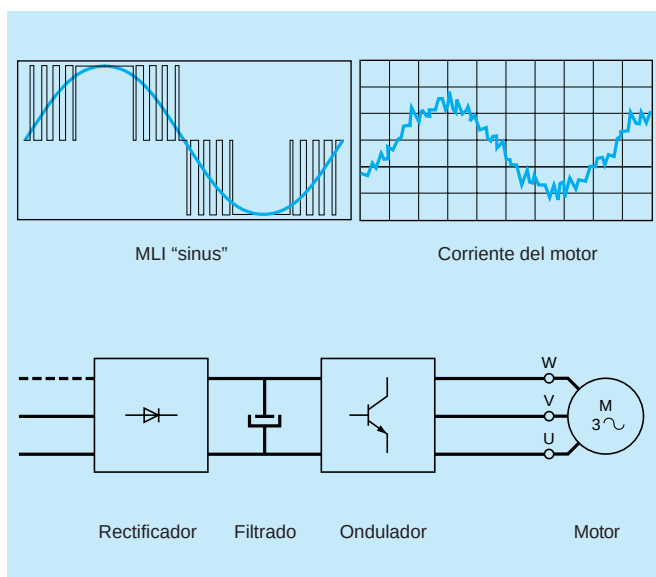
El control de la modulación se lleva a cabo por medio de un microprocesador y un ASIC (2). La modulación depende de las tensiones y las frecuencias, por tanto, de las velocidades solicitadas en la salida.

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.

(1) MLI: Modulación de anchura de los impulsos según una ley sinus, PWM "sinus", en inglés, Pulse Width Modulation "sinus".

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



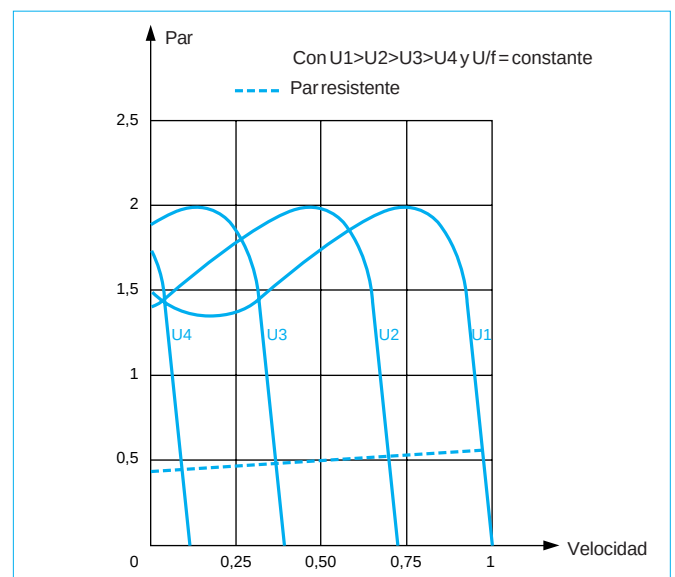
Esquema de base de un convertidor de frecuencia

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 y la protección contra cortocircuitos.

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.



Curva de par/velocidad del arranque con convertidor de frecuencia

El variador de tensión

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

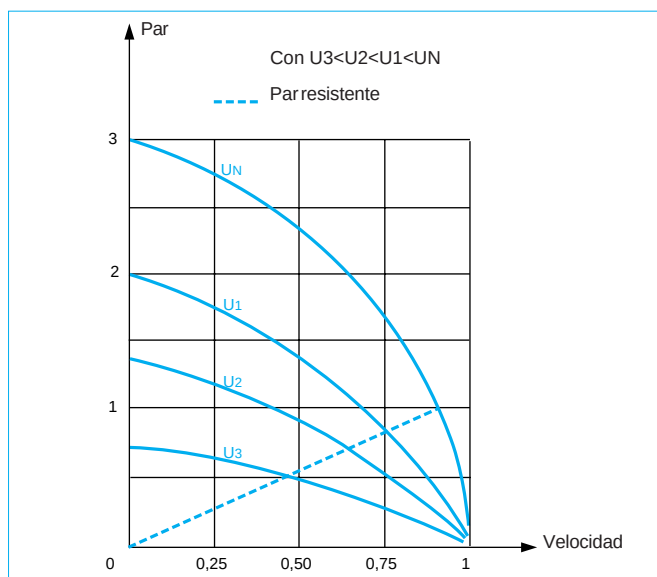
Los sistemas electromecánicos de regulación de velocidad se utilizan con menor frecuencia desde la generalización de los variadores de velocidad electrónicos. Se citan a continuación a título informativo.

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 Léonard

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.



Curva par/velocidad del arranque con variador de tensión

Frenado eléctrico de los motores asíncronos trifásicos

En numerosas aplicaciones, la parada del motor se lleva a cabo por simple deceleración natural. En estos casos, el tiempo de deceleración depende exclusivamente de la inercia de la máquina accionada. Sin embargo, en muchas ocasiones es necesario reducir este tiempo, y el frenado eléctrico constituye una solución eficaz y simple. Con respecto al frenado mecánico o hidráulico, ofrece la ventaja de la regularidad y no utiliza ninguna pieza de desgaste.

Frenado por contracorriente

Este método consiste en reconectar el motor a la red en sentido inverso después de haberlo aislado y mientras sigue girando.

Es un método de frenado muy eficaz, pero debe detenerse con antelación suficiente para evitar que el motor comience a girar en sentido contrario.

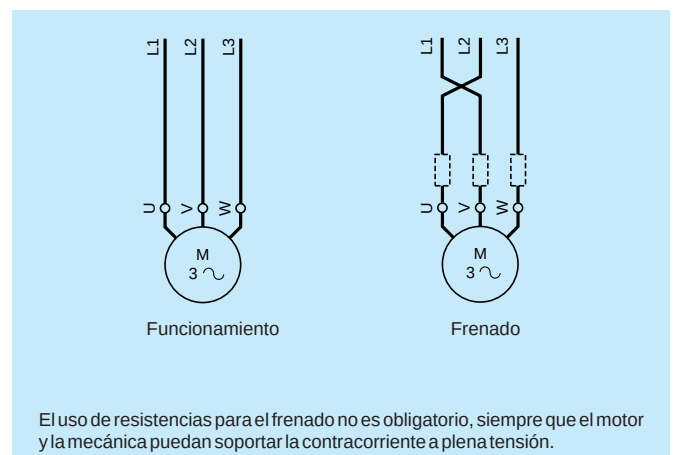
Se utilizan varios dispositivos automáticos para controlar la parada en el momento en que la velocidad se aproxima a cero: detectores de parada de fricción, detectores de parada centrífugos, dispositivos cronométricos, etc.

Motor de jaula

Antes de adoptar este sistema, es imprescindible comprobar que el motor sea capaz de soportar frenados por contracorriente. Además de las restricciones mecánicas, este procedimiento impone ciertas limitaciones térmicas importantes al rotor, ya que la energía correspondiente a cada frenado (energía de deslizamiento tomada de la red y energía cinética) se disipa en la jaula.

En el momento del frenado, las puntas de corriente y de par son claramente superiores a las que se producen durante el arranque. Para obtener un frenado sin brusquedad, suele insertarse una resistencia en serie con cada fase del estator durante el acoplamiento en contracorriente. A continuación, el par y la corriente se reducen como en el caso del arranque estático.

Los inconvenientes del frenado por contracorriente de los motores de jaula son tan importantes que este método sólo se utiliza en ciertas aplicaciones con motores de escasa potencia.



Frenado por contracorriente de un motor de jaula

Motor de anillos

Para limitar la punta de corriente y de par, antes de acoplar el estator del motor a contracorriente, es obligatorio volver a insertar las resistencias rotóricas utilizadas durante el arranque. También suele ser necesario añadir una sección adicional denominada de frenado.

El par de frenado puede regularse fácilmente mediante la elección de una resistencia rotórica adecuada.

La tensión rotórica en el momento de la inversión es casi doble a la del momento de la parada, lo que puede obligar a tomar precauciones especiales de aislamiento.

Al igual que sucede con los motores de jaula, el circuito rotórico produce una gran cantidad de energía que, en gran medida, se disipa en las resistencias.

Es posible controlar automáticamente la parada al alcanzar la velocidad nula por medio de uno de los dispositivos mencionados anteriormente o mediante la acción de un relé de tensión o de frecuencia insertado en el circuito rotórico.

Este sistema permite retener una carga arrastrante a velocidad moderada. La característica es muy inestable (fuertes variaciones de velocidad por débiles variaciones de par).

Frenado por inyección de corriente rectificada

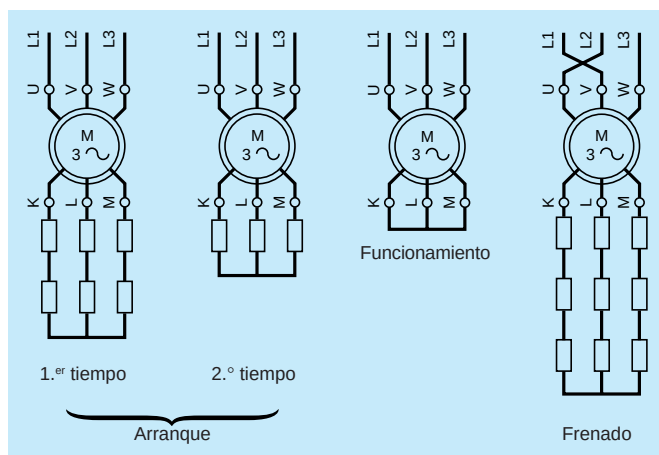
Este modo de frenado se utiliza en motores de anillos y de jaula.

Comparado con el sistema de contracorriente, el coste de la fuente de corriente rectificada se ve compensado por el menor volumen de las resistencias. Con los variadores y arrancadores electrónicos, esta posibilidad de frenado se ofrece sin suplemento de precio.

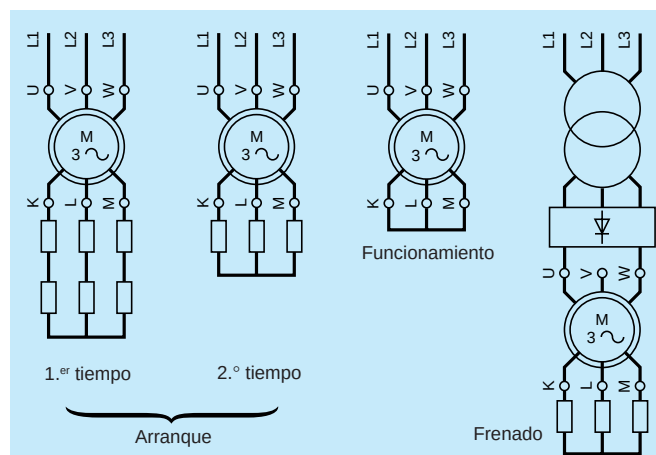
El proceso consiste en enviar corriente rectificada al estator previamente separado de la red. Dicha corriente crea un flujo fijo en el espacio. Para que el valor del flujo corresponda a un frenado adecuado, la corriente debe ser aproximadamente 1,3 veces la corriente nominal. Generalmente, el excedente de pérdidas térmicas causado por esta ligera sobreintensidad se compensa por el tiempo de parada que sigue al frenado. Dado que el valor de la corriente queda establecido por la única resistencia de los devanados del estator, la tensión de la fuente de corriente rectificada es débil. Dicha fuente suele constar de rectificadores o proceder de los variadores. Estos elementos deben poder soportar las sobretensiones transitorias producidas por los devanados recién desconectados de la red alterna (por ejemplo, a 380 voltios eficaces).

El movimiento del rotor representa un deslizamiento con respecto a un campo fijo del espacio (mientras que, en el sistema de contracorriente, el campo gira en sentido inverso). El motor actúa como un generador síncrono que suministra corriente al rotor. Las características que se obtienen con un sistema de frenado por inyección de corriente rectificada son muy diferentes a las que resultan de un sistema de contracorriente:

- la energía disipada en las resistencias rotóricas o en la jaula es menor. Se trata únicamente del equivalente a la energía mecánica comunicada por las masas en movimiento. La única energía que procede de la red es la excitación del estator,
- si la carga no es arrastrante, el motor no vuelve a arrancar en sentido contrario,



Frenado por contracorriente de un motor de anillos



Frenado por inyección de corriente rectificada de un motor de anillos

– si la carga es arrastrante, el sistema proporciona un frenado permanente que retiene la carga a baja velocidad. La característica es mucho más estable que en contracorriente.

En el caso de los motores de anillos, las características de par-velocidad dependen de la elección de las resistencias. En el caso de los motores de jaula, este sistema permite regular fácilmente el par de frenado actuando sobre la corriente continua de excitación.

Para evitar recalentamientos inútiles, es preciso prever un dispositivo que corte la corriente del estator una vez concluido el frenado.

Frenado por funcionamiento en hipersíncrono

En este caso, el motor es accionado por su carga superando la velocidad de sincronismo, se comporta como un generador asíncrono y desarrolla un par de frenado. La red recupera prácticamente toda la pérdida de energía.

En el caso de los motores de elevación, este tipo de funcionamiento provoca la bajada de la carga a la velocidad nominal. El par de frenado equilibra con precisión el par generado por la carga y proporciona una marcha a velocidad constante (no una deceleración).

En el caso de los motores de anillos, es fundamental cortocircuitar la totalidad o parte de las resistencias rotóricas para evitar que el motor se accione a una velocidad muy superior a la nominal, con los riesgos mecánicos que ello implicaría.

Este método ofrece todas las propiedades idóneas de un sistema de retención de carga arrastrante:

- la velocidad es estable y prácticamente independiente del par arrastrante,

- la energía se recupera y se envía de nuevo a la red.

Sin embargo, sólo corresponde a una velocidad: aproximadamente a la velocidad nominal.

Los motores de varias velocidades también emplean el frenado hipersíncrono durante el paso de alta a baja velocidad.

Otros sistemas de frenado

Todavía puede encontrarse el frenado monofásico, que consiste en alimentar el motor por las dos fases de la red. En vacío, la velocidad es nula. Este funcionamiento va acompañado de desequilibrios y pérdidas importantes. Cabe mencionar igualmente el frenado por ralentizador de corrientes de Foucault. La energía mecánica se disipa en calor dentro del ralentizador. La regulación del frenado se realiza con facilidad mediante un devanado de excitación. Sin embargo, el fuerte aumento de inercia es un inconveniente.

Motores asíncronos monofásicos

El motor asíncrono monofásico, menos utilizado que su homólogo trifásico, desempeña un papel nada despreciable en las aplicaciones de baja potencia. A igualdad de potencia, es más voluminoso que un motor trifásico.

Por otra parte, tanto su rendimiento como su coseno φ son mucho más débiles que en el caso del motor trifásico y varían considerablemente en función de la potencia y del fabricante.

Composición

El motor monofásico, al igual que el trifásico, consta de dos partes:

El estator

Incluye un número par de polos y sus bobinados están conectados a la red de alimentación.

El rotor

En la mayoría de los casos es de jaula.

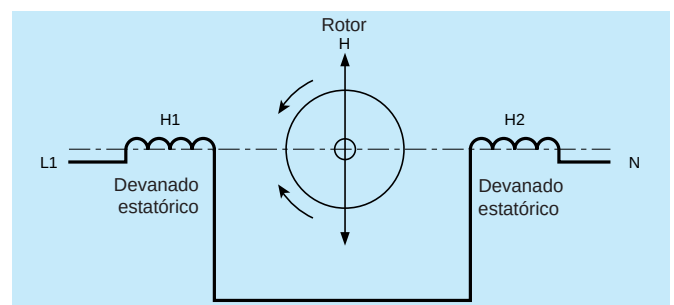
Principio de funcionamiento

Considere un estator que incluye dos devanados, L1 y N, conectados a la red de alimentación.

La corriente alterna monofásica engendra un campo alterno simple en el rotor H que es la superposición de dos campos giratorios, H1 y H2, de igual valor y de sentido opuesto.

En el momento de la parada, dado que el estator está siendo alimentado, los campos presentan el mismo deslizamiento con respecto al rotor y, por tanto, producen dos pares iguales y opuestos. El motor no puede arrancar.

Un impulso mecánico sobre el rotor causa la desigualdad de los deslizamientos. Uno de los pares disminuye mientras que el otro aumenta. El par resultante provoca el arranque del motor en el sentido en el que ha sido lanzado.



Principio de funcionamiento de un motor asíncrono monofásico

Modos de arranque

Los motores monofásicos no pueden arrancar solos. Por tanto, se emplean diferentes técnicas para su arranque.

Arranque por fase auxiliar

En este tipo de motores, el estator consta de dos devanados con un decalado geométrico de 90°.

Durante la puesta en tensión, y debido a las diferencias de fabricación de los bobinados, una corriente I_1 atraviesa la fase principal y una corriente más débil I_2 circula por la fase auxiliar con cierta diferencia de tiempo respecto de I_1 . Dado que los campos están generados por dos corrientes desfasadas entre sí, el campo giratorio resultante es suficiente para provocar el arranque en vacío del motor. Cuando el motor alcanza aproximadamente el 80% de su velocidad, es posible retirar del servicio (acoplador centrífugo) la fase auxiliar o bien mantenerla. De este modo, el estator del motor está transformado en el momento del arranque o permanentemente, como estator bifásico. Para invertir el sentido de rotación, basta con invertir las conexiones de una fase.

Dado que el par que se obtiene durante el arranque es débil, conviene aumentar el decalado entre los dos campos que producen los bobinados. Para ello, se emplean los siguientes procedimientos de arranque.

Arranque por fase auxiliar y resistencia

Una resistencia situada en serie en la fase auxiliar aumenta tanto su impedancia como la diferencia de tiempo entre I_1 y I_2 .

Al finalizar el arranque, el funcionamiento es idéntico al del método de fase auxiliar.

Arranque por fase auxiliar e inductancia

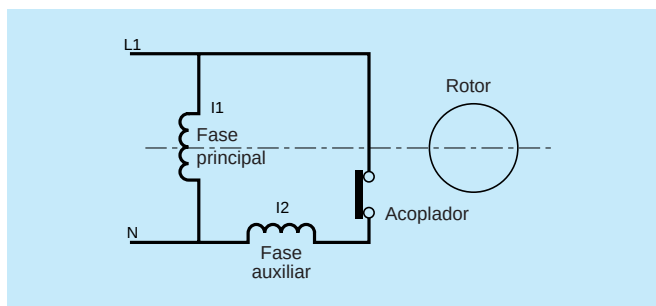
Se utiliza el principio anterior, pero la resistencia se sustituye por una inductancia montada en serie en la fase auxiliar para aumentar la diferencia entre las dos corrientes.

Arranque por fase auxiliar y condensador

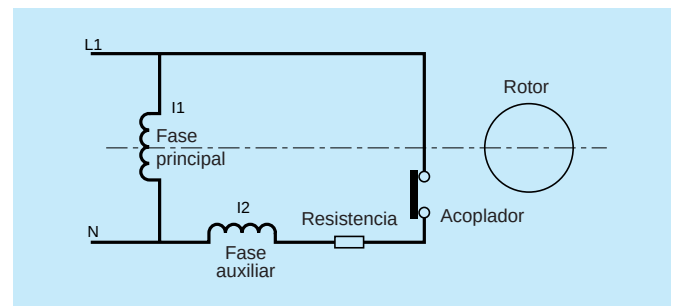
Es el dispositivo más utilizado. Consiste en situar un condensador en la fase auxiliar.

El condensador provoca un desfase inverso al de una inductancia. Por tanto, el funcionamiento durante el período de arranque y la marcha normal es muy similar al de un motor bifásico de campo giratorio. Por otra parte, tanto el par como el factor de potencia son más importantes.

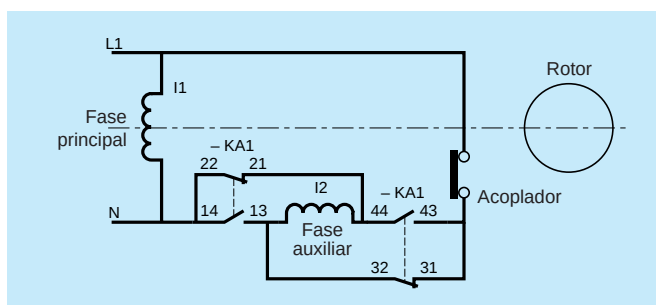
Una vez arrancado el motor, es necesario mantener el desfase entre ambas corrientes, pero es posible reducir la capacidad del condensador, ya que la impedancia del estator ha aumentado.



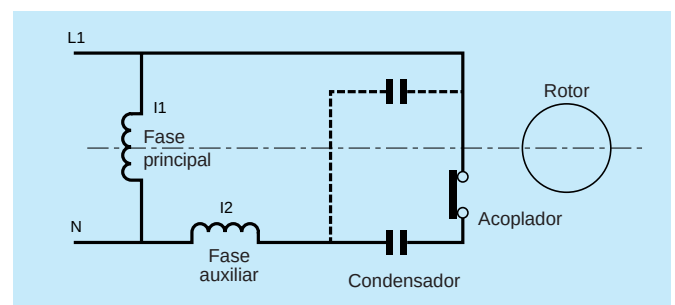
Arranque por fase auxiliar



Arranque por fase auxiliar y resistencia



Dispositivo de inversión de conexiones de la fase auxiliar



Arranque por fase auxiliar y condensador

Motores de corriente continua

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, a las aplicaciones en las que se requiere un alto rendimiento e incluso a las potencias elevadas (varios 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 mediante fabricación a todo tipo de aplicaciones, ya que no depende de la frecuencia de la red.

En cambio, son menos robustos que los motores asíncronos y requieren un mantenimiento regular del colector y de las escobillas.

Composición

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. El inducido es móvil en torno a su eje y queda separado del inductor por un entrehierro. A su alrededor, varios conductores se reparten de manera regular.

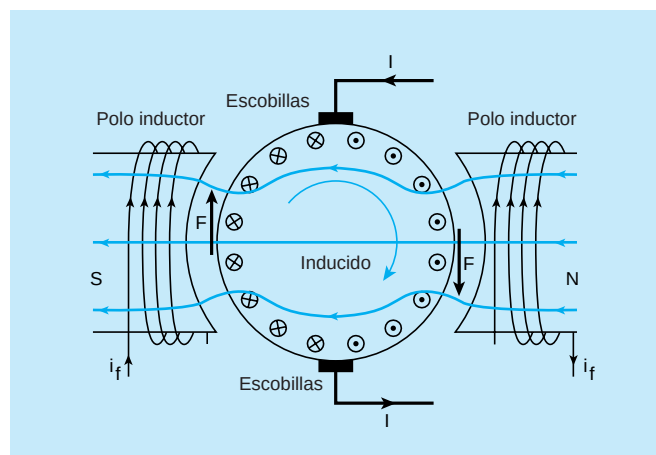
El colector y las escobillas

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

Principio de funcionamiento

Cuando 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.

Cuando se alimenta el inducido, dos corrientes de 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, 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.



Producción de un par en un motor de corriente continua

Cuando se alimenta el motor a una tensión continua o rectificada U , se produce una fuerza contraelectromotriz E cuyo valor es $E = U - RI$.

RI corresponde a la caída de tensión óhmica del inducido. La f_{cem} E está vinculada a la velocidad y a la excitación 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 f_{cem} 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.

Distintos tipos de motores de corriente continua

De excitación paralela (separada o shunt)

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.

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.

De excitación serie-paralela (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.