

# 4 capítulo

## Arranque y protección de motores de CA

*Presentación :*

- *Arranque y frenado de motores de CA*
- *Protección de motores de CA y análisis de fallos*
- *Guía de elección de dispositivos de protección*



**4.1 Sistemas de arranque de motores asíncronos**

**4.2 Frenado eléctrico de motores trifásicos asíncronos**

**4.3 Unidades de arranque motor multifunción**

**4.4 Protección de motores**

**4.5 Pérdidas de energía en el motor**

**4.6 Causas y efectos de los fallos**

**4.7 Funciones de protección**

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

M

## 4. Arranque y protección de motores de CA

Esta sección está dedicada a los sistemas de arranque y protección de motores asíncronos de todo tipo.

La protección del motor es requerida para asegurar que la instalación funciona de forma correcta y para salvaguardar máquinas y equipamientos.

Tanto la tecnología, como el arranque y el control de la velocidad son descritos de forma breve. Por favor, consultar las secciones correspondientes en esta guía para más información.

La protección de personas no se contempla en esta sección. Para más información en este aspecto, consultar la sección específica de esta guía. Más detalles de esta temática se pueden consultar en la Guía de Instalaciones Eléctricas publicada por Schneider Electric.

### 4.1 Sistemas de arranque de motores asíncronos

#### ■ Introducción

Durante el arranque de un motor, se consume una corriente muy elevada que puede hacer caer la tensión de la red principal lo suficiente como para afectar al funcionamiento normal de los receptores conectados a ella. Esta caída podría ser lo suficientemente severa como para que se note en la iluminación. Para evitar esto, algunas normativas prohíben el uso de motores con arranque directo a partir de una cierta potencia. Para más información, consultar la normativa relacionada con este aspecto.

Existen diversos sistemas de arranque que se diferencian según especificaciones del motor y de la carga.

La elección se basa en factores eléctricos, mecánicos y, claro está, económicos.

El tipo de carga es también un factor importante a la hora de elegir un arranque.

#### ■ Principales modos de arranque

##### □ Arranque directo

Se trata del modo de arranque más sencillo en el que el estator se acopla de forma directa a la red (⇒ Fig.1). El motor se basa en sus características naturales.

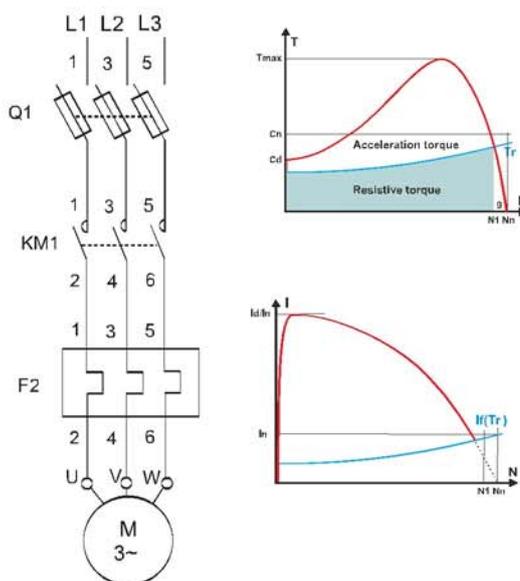
En el momento de la puesta bajo tensión, el motor actúa como un transformador cuyo secundario, formado por la jaula muy poco resistente del rotor, está en cortocircuito. La corriente inducida en el rotor es importante. La corriente primaria y la secundaria son prácticamente proporcionales. Hay una punta de corriente:  $I_{\text{arranque}} = 5 \text{ a } 8 I_{\text{nominal}}$ .

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, elevado par de arranque, rapidez, 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 que impide el arranque brusco,
- el par de arranque debe ser elevado.



↑ Fig. 1 Arranque directo

## 4. Arranque y protección de motores de CA

### □ Arranque estrella-triángulo

Sólo es posible utilizar este modo de arranque (≅ Fig.2) 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 devanado debe realizarse de manera que el acoplamiento en triángulo corresponda con la tensión de la red: por ejemplo, en red trifásica de 380V, es preciso utilizar un motor devanado a 380V en triángulo y 660V 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 por  $\sqrt{3}$  la tensión nominal del motor en estrella (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. La corriente se divide nuevamente por  $\sqrt{3}$ , por lo que en total se divide por 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.

La corriente que recorre los devanados se interrumpe con la apertura del contactor 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.

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; existen varios sistemas.

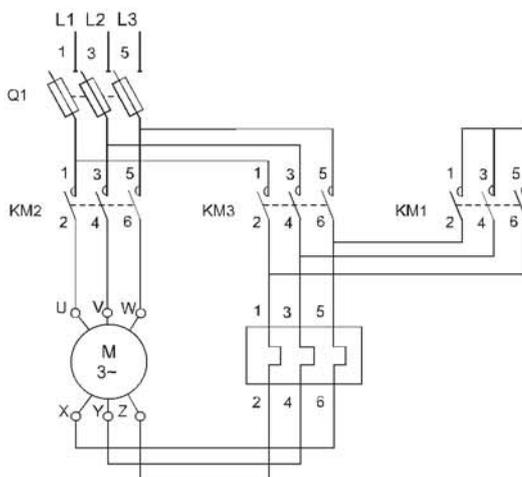
Un sistema es introducir una temporización de 1 a 2 segundos al paso estrella-triángulo. Esta medida permite disminuir la  $f_{cem}$  y, por tanto, la punta de corriente transitoria.

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

Otro sistema es arrancar en 3 tiempos: estrella-triángulo + resistencia-triángulo.

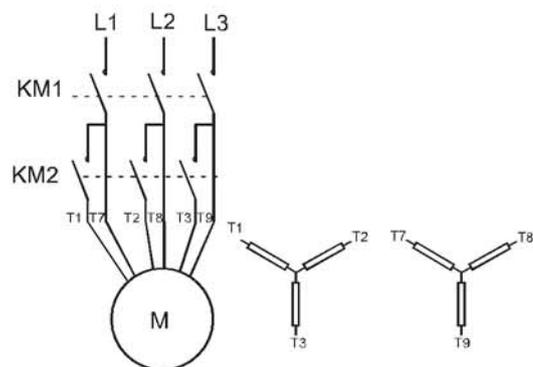
El corte se mantiene, pero la resistencia se pone en serie aproximadamente durante tres segundos con los devanados acoplados en triángulo. Esta medida reduce la punta de corriente transitoria.

El uso de estas variantes conlleva la instalación de componentes adicionales y el consiguiente aumento del coste total.



↑ Fig. 2 Arranque estrella-triángulo

## 4. Arranque y protección de motores de CA



↑ Fig. 3 Arranque "part-winding"

### □ Arranque de motores de devanados partidos "part-winding"

Este sistema ( $\Rightarrow$  Fig. 3), poco utilizado en Europa, es muy común en el mercado norteamericano (tensión de 230/460 V, relación igual a 2). 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 valor de 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 del 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.

### □ Arranque estático por resistencias

Con este sistema ( $\Rightarrow$  Fig. 4), el motor arranca bajo tensión reducida mediante la inserción de resistencias en serie con los devanados. Una vez se estabiliza 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 acoplamiento de los devanados no se modifica. Así, pues, 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. Corriente y par de arranque generalmente valen:

- $I_d = 4,5 I_n$
- $C_d = 0,75 C_n$

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.

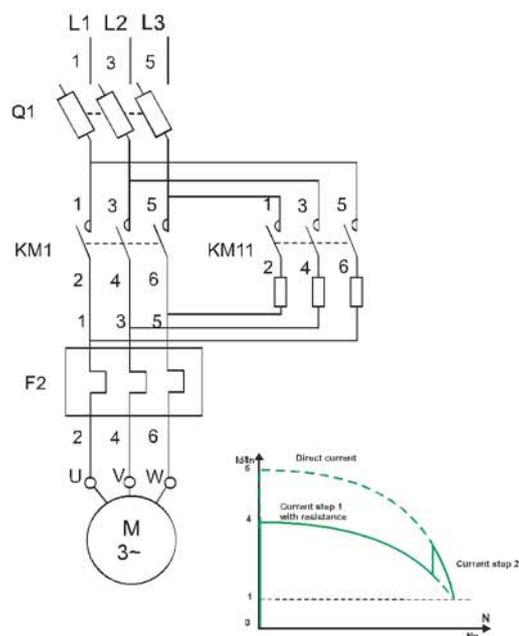
La caída de tensión es proporcional a la corriente absorbida por el motor. Dado que la corriente disminuye a medida que se acelera el motor, sucede lo mismo con la caída de tensión de la resistencia. Por tanto, la tensión que se aplica a las bornas es mínima en el momento del arranque y aumenta progresivamente.

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.

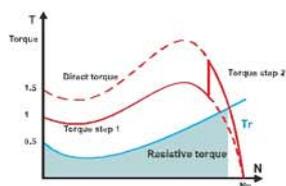
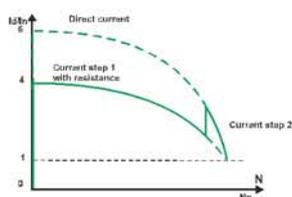
Este tipo de arranque es, por tanto, apropiado para las máquinas cuyo par resistente crece con la velocidad, por ejemplo los ventiladores.

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.

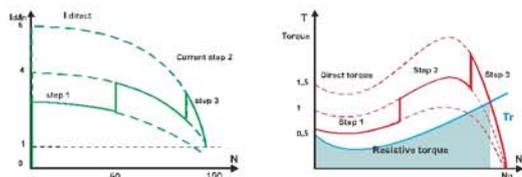
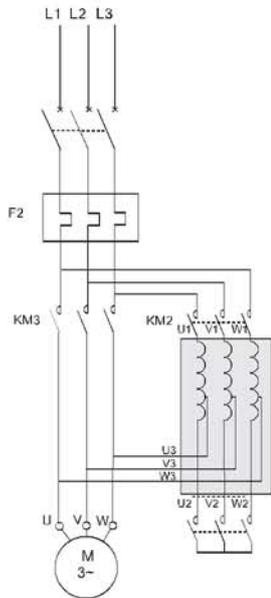
Por el contrario, la eliminación de la resistencia al finalizar el arranque se lleva a cabo sin interrumpir la alimentación del motor y, por tanto, sin fenómenos transitorios.



↑ Fig. 4 Arranque estático por resistencias



## 4. Arranque y protección de motores de CA



↑ Fig. 5 Arranque por autotransformador

### □ Arranque por autotransformador

El motor se alimenta a tensión reducida mediante un autotransformador que, una vez finalizado el arranque, queda fuera del circuito (⇒ Fig.5).

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. Por norma general, el transformador permite seleccionar la relación de transformación,
- antes de pasar al acoplamiento a plena tensión, la estrella se abre. En ese momento, la fracción de devanado 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, muy corto (fracción de segundo). Las inductancias en serie con el motor se cortocircuitan y, a continuación, el dispositivo queda fuera del circuito.

La corriente y el par de arranque varían en la misma proporción. Se dividen por  $(U \text{ red} / U \text{ reducida})^2$ .

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.

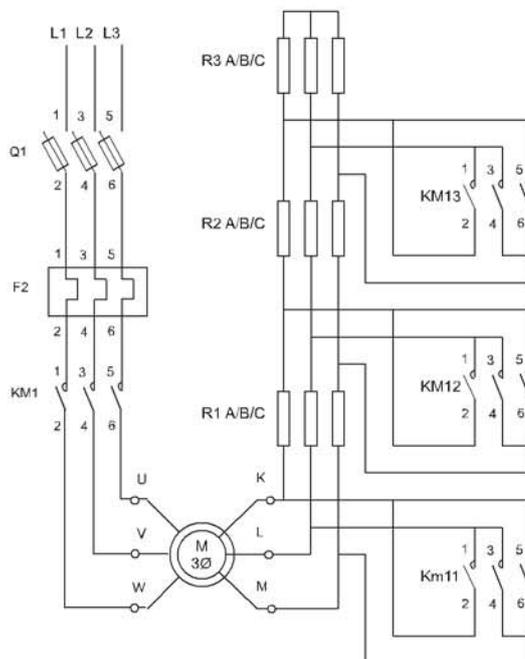
Este modo de arranque suele utilizarse en motores de BT con potencia superior a 150 kW. Sin embargo, el precio de los equipos es relativamente alto debido al elevado coste del autotransformador.

### □ Arranque rotórico por resistencias de los motores de anillos

Un motor de anillos no puede arrancar en directo (devanados rotóricos en cortocircuito) sin provocar puntas de corriente inadmisibles. Es necesario insertar en el circuito rotórico (⇒ Fig.6) 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 par-velocidad resultante: para un par dado, la velocidad es menor cuanto mayor sea la resistencia. Así, ésta debe insertarse por completo en el arranque y la plena velocidad se alcanza cuando la resistencia está cortocircuitada.

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



↑ Fig. 6 Arranque rotórico por resistencias

## 4. Arranque y protección de motores de CA

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 se debe 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 electrónico "soft starter"

Este es un sistema de arranque efectivo ( $\Rightarrow$  Fig.7) para arrancar y parar un motor de manera suave (ver la sección de control electrónico de velocidad para más detalles).

Se puede usar para:

- limitar la corriente,
- ajustar el par.

El control por limitación de corriente establece un valor máximo para ésta durante la fase de arranque y limita las prestaciones del par. Este control es especialmente adecuado para "turbomáquinas" (bombas centrífugas, ventiladores).

El control por ajuste de par optimiza las prestaciones de éste en la fase de arranque y reduce el valor de la corriente. Este control es perfecto para máquinas con par constante.

Este tipo de arranque puede tener diferentes diagramas:

- funcionamiento unidireccional,
- funcionamiento bidireccional,
- derivación de dispositivos al final del proceso de arranque,
- arranque y frenado de varios motores en cascada ( $\Rightarrow$  Fig.7),
- etc.

### □ Arranque por convertidor de frecuencia

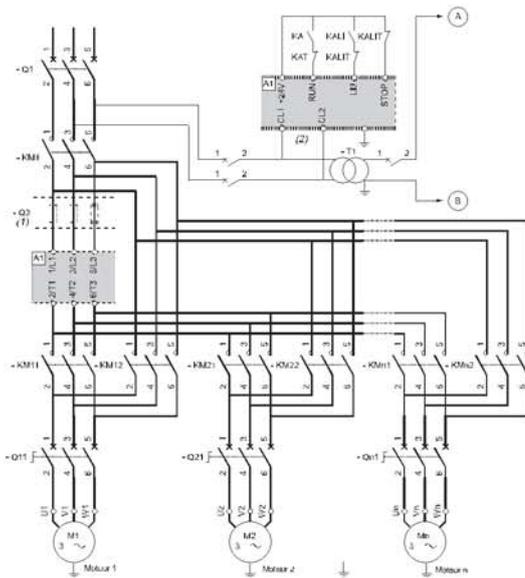
Representa otro sistema efectivo de arranque ( $\Rightarrow$  Fig.8) a usar siempre que se quiera controlar y ajustar la velocidad (ver la sección de control electrónico de velocidad para más detalles).

Se utiliza con el objetivo de:

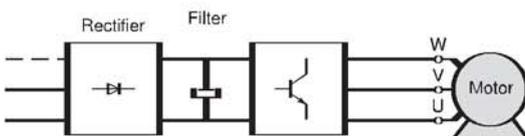
- arrancar con cargas de gran inercia,
- arrancar con grandes cargas en redes de baja capacidad de cortocircuito,
- optimizar el consumo eléctrico adaptando la velocidad de lo que se conoce como "turbomáquinas".

Este sistema de arranque se puede usar en todos los tipos de máquina.

Indicar que esta solución en principio está pensada para ajustar la velocidad del motor, por lo que el arranque es una aplicación secundaria.



↑ Fig. 7 Arranque de múltiples motores con un "soft starter"



↑ Fig. 8 Esquema de un convertidor de frecuencia

# 4. Arranque y protección de motores de CA

□ Tabla resumen de los arranques de motores trifásicos (⇒ Fig.9)

	Directo	Estrella Triángulo	"Part winding"	Resistencias	Autotransformador	Motor anillos	"Soft starter"	Convertidor frecuencia
Motor	Estándar	Estándar	6 devanados	Estándar	Estándar	Específico	Estándar	Estándar
Coste	+	++	++	+++	+++	+++	+++	++++
Corriente arranque motor	5 a 10 In	2 a 3 In	2 In	Aprox. 4.5 In	1.7 a 4 In	Aprox. 2 In	4 a 5 In	In
Caida de tensión	Alta	Alta en el cambio de conexión	Baja	Baja	Baja; precaución al conectar en directo	Baja	Baja	Baja
Harmónicos de tensión y corriente	Alto	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Bajo	Alto	Alto
Factor de potencia	Bajo	Bajo	Moderado	Moderado	Bajo	Moderado	Bajo	Alto
Número de arranq. disponibles	Restringido	2-3 veces más que directo	3-4 veces más que directo	3-4 veces más que directo	3-4 veces más que directo	2-3 veces más que directo	Limitado	Elevado
Par disponible	Aprox. 2.5 Cn	0.2 a 0.5 Cn	2 Cn	Cn	Aprox. 0.5 Cn	Aprox. 2 Cn	Aprox. 0.5 Cn	1.5 to 2 Cn
Solicit. térmica	Muy alta	Alta	Moderada	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Baja
Solicitación mecánica	Muy alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Baja	Moderada	Baja
Tipo de carga recomendado	Cualq.	Sin carga	Par creciente	Bombas y vent.	Bombas y vent.	Cualq.	Bombas y vent.	Cualq.
Carga gran inercia	Si*	No	No	No	No	Si	No	Si

\* Este sistema de arranque requiere que el motor esté específicamente dimensionado.

↑ Fig. 9 Tabla resumen

## □ Arranque de motores monofásicos

Un motor monofásico no puede arrancar por sí solo; existen diversas maneras de hacerlo funcionar.

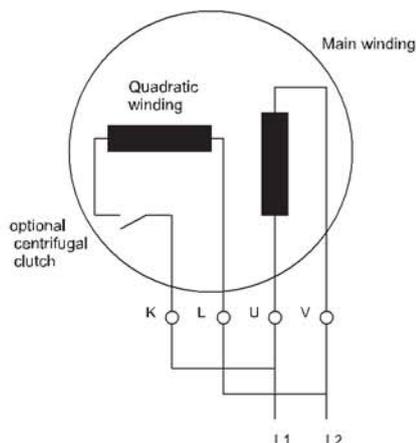
### □ Arranque por fase auxiliar

En este tipo de motores (⇒ Fig.10), 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 devanados, una corriente I1 atraviesa la fase principal y una corriente más débil I2 circula por la fase auxiliar con cierta diferencia de tiempo respecto de I1. 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 la conexiones de una fase cualquiera.

Dado que el par que se obtiene durante el arranque es débil, conviene aumentar el decalado entre los dos campos que producen los devanados.



↑ Fig. 10 Motor monofásico con fase auxiliar

## 4. Arranque y protección de motores de CA

### □ 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 I1 y I2.

Al finalizar el arranque, el funcionamiento es idéntico al caso 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 ( $\Rightarrow$  Fig.11). Consiste en situar un condensador en la fase auxiliar. Para un condensador permanente, el valor de capacidad ronda los  $8\mu\text{F}$  para un motor de 200W. En el arranque, quizá sea necesario un condensador extra de  $16\mu\text{F}$  que es eliminado una vez ha finalizado este proceso.

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. El par de arranque triplica aproximadamente el par nominal, mientras que el par máximo alcanza un valor doble.

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.

El esquema ( $\Rightarrow$  Fig.11) representa un motor monofásico con un condensador permanentemente conectado. Existen otras configuraciones, como la apertura de la fase auxiliar a través de un interruptor centrífugo cuando se alcanza una velocidad.

Un motor trifásico (230/400V) se puede usar con alimentación monofásica a 230V si se utiliza un condensador de arranque y otro permanentemente conectado. Esta configuración disminuye la potencia útil (derating de aprox. 0.7), el par de arranque y la reserva térmica.

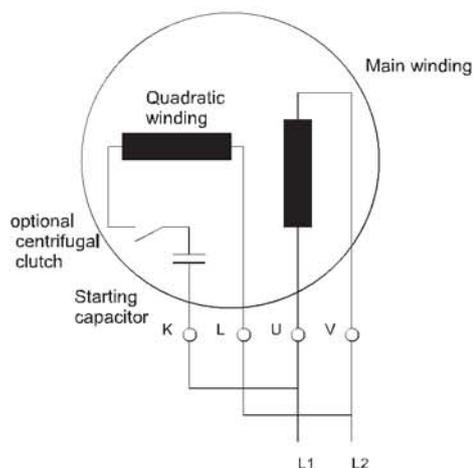
Sólo los motores de 4 polos de potencia inferior a 4kW resultan adecuados para este sistema.

Los fabricantes tienen tablas para escoger condensadores con valores adecuados.

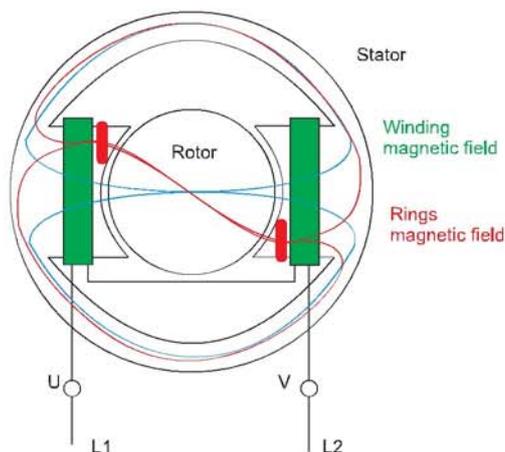
### □ Arranque con espira de sombra

Este dispositivo ( $\Rightarrow$  Fig.12) se utiliza en motores de muy baja potencia (alrededor de 100W). Los polos tienen unas muescas con espiras cortocircuitadas insertadas. La corriente inducida en ellas produce distorsiones en el campo rotativo y provoca el arranque del motor.

La eficiencia es baja pero adecuada en este rango de potencia.



↑ Fig. 11 Motor monofásico con arranque por fase auxiliar y condensador



↑ Fig. 12 Arranque con espira de sombra

# 4. Arranque y protección de motores de CA

## 4.2 Frenado eléctrico de motores trifásicos asíncronos

### ■ Introducción

En algunos sistemas, los motores se paran por la deceleración natural. El tiempo que conlleva este proceso depende únicamente de la inercia y del par resistente de la máquina que acciona el motor. 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, algo que no es nada deseable en la mayoría de aplicaciones.

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 o centrífugos,
- dispositivos cromométricos,
- relés medidores de frecuencia o de la tensión del rotor (anillos rozantes), etc.

### □ Motor de jaula de ardilla

Antes de adoptar este sistema (*⇒ Fig.13*), 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. Las sollicitaciones térmicas durante el frenado triplican las de la aceleración.

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 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.

### □ Motor de anillos rozantes

Para limitar puntas de corriente y par, antes de acoplar el estator a contracorriente, es obligatorio volver a insertar las resistencias rotóricas durante el arranque. También es necesario añadir una sección adicional de frenado. (*⇒ Fig.14*).

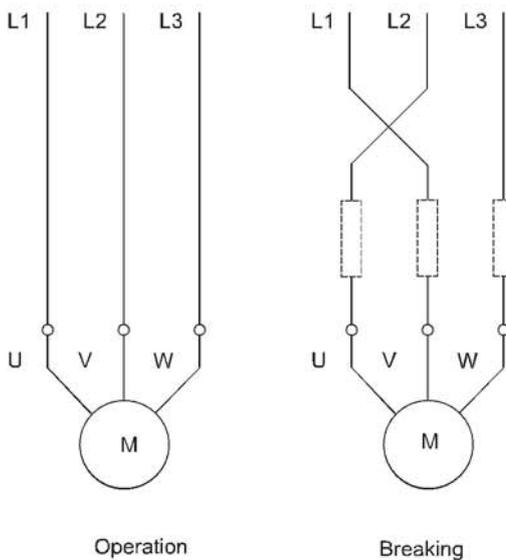
El par de frenado puede regularse fácilmente mediante la elección de una resistencia rotórica adecuada.

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

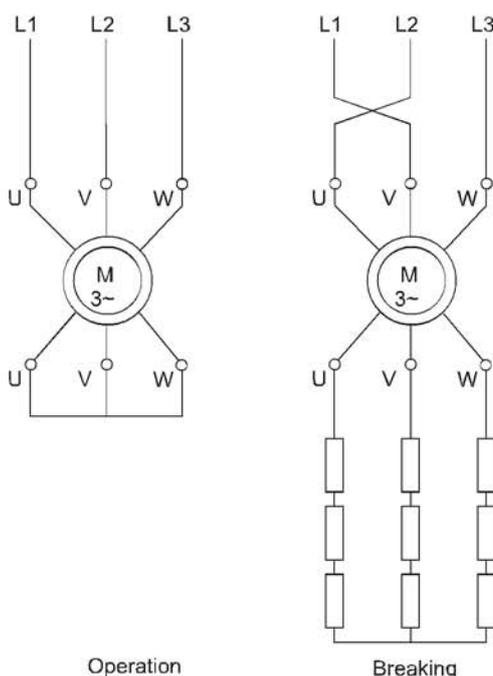
Al igual que sucede con los motores de jaula, el circuito rotórico produce una gran cantidad de energía que, en gran medida, se disipa en las resistencias.

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).

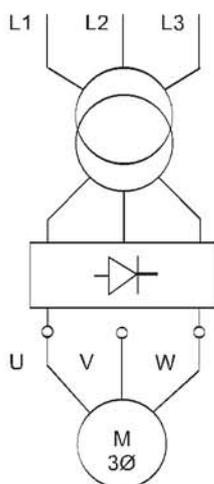


↑ Fig. 13 Principio de frenado por contracorriente



↑ Fig. 14 Principio de frenado por contracorriente en un motor de anillos rozantes

## 4. Arranque y protección de motores de CA



↑ Fig. 15 Principio de frenado por inyección de corriente rectificada

### ■ Frenado por inyección de corriente rectificada

Este modo de frenado se utiliza en motores de anillos y de jaula (*⇒ Fig.15*). 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 380V 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 este sistema 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 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 el sentido contrario,
- 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. Sin embargo, el par de frenado será menor cuando el motor funcione a gran velocidad.

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

### ■ Frenado electrónico

El frenado electrónico se consigue simplemente con un variador de velocidad y una resistencia de frenado. El motor asíncrono actúa entonces como un generador y la energía mecánica se disipa en la resistencia de frenado sin incrementar las pérdidas en el motor.

Para más información, ver la sección de control electrónico de la velocidad en *el capítulo de unidades de arranque motor*.

## 4. Arranque y protección de motores de CA

### ■ 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, a excepción de una pequeña parte que se disipa.

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 es idóneo para un sistema de retención de carga arrastrante:

- la velocidad es estable y prácticamente independiente del par,
- 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 este tipo de frenado durante el paso de alta a baja velocidad.

El frenado por funcionamiento hipersíncrono se consigue fácilmente con un variador de velocidad, donde bajando la consigna de frecuencia automáticamente se entra en este tipo de funcionamiento.

### ■ 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. El par de frenado está limitado a una tercera parte del par motor máximo. El frenado monofásico no puede frenar toda la carga y requiere de la ayuda del frenado por contracorriente. Algunos de sus inconvenientes son los desequilibrios y las pérdidas importantes que se producen.

Cabe mencionar igualmente el frenado por ralentizador de corrientes de Foucault. La energía mecánica se disipa en forma de calor dentro del ralentizador. La regulación del frenado se realiza con facilidad mediante un devanado de excitación. Sin embargo, el fuerte aumento de la inercia representa un gran inconveniente.

### □ Frenado por inversión de marcha

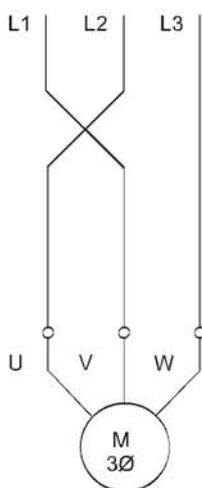
Los motores trifásicos asíncronos ( $\Rightarrow$  Fig.16) se pueden frenar simplemente intercambiando las conexiones de dos devanados para invertir el sentido de giro del campo rotativo del motor.

El motor normalmente invierte su marcha si está parado. Si está girando, la inversión de fases provoca un frenado por contracorriente (ver el párrafo sobre el motor de anillos rozantes). El resto de sistemas de frenado descritos anteriormente pueden también ser usados.

La inversión de marcha de un motor monofásico es otra posibilidad si todos los devanados son accesibles.

### ■ Definición de tipos de servicio

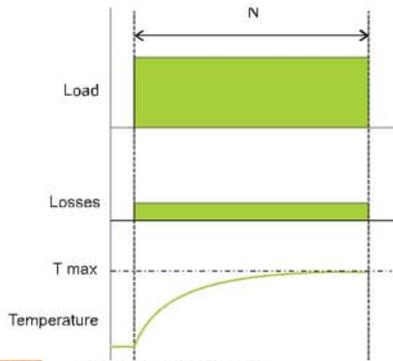
Para un motor eléctrico, el número de arranques y frenadas por unidad de tiempo tiene una gran incidencia en la temperatura interna. La norma IEC: Máquinas Eléctricas Rotativas - Parte 1: Características asignadas y de funcionamiento (IEC 60034-1:2004) da los tipos de servicio que permiten calcular la calor generada y dimensionar correctamente un motor de acuerdo a los requerimientos. La siguiente información consta de una visión general de estos tipos de servicio. Información adicional se puede encontrar en la normativa IEC y en catálogos de fabricantes.



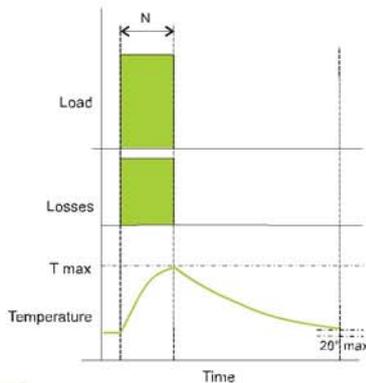
↑ Fig. 16

Principio de frenado por inversión de marcha de un motor asíncrono

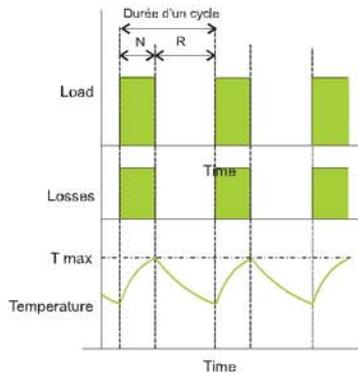
# 4. Arranque y protección de motores de CA



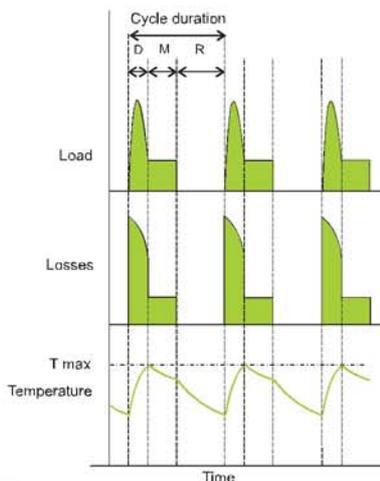
↑ Fig. 17 Tipo de servicio S1



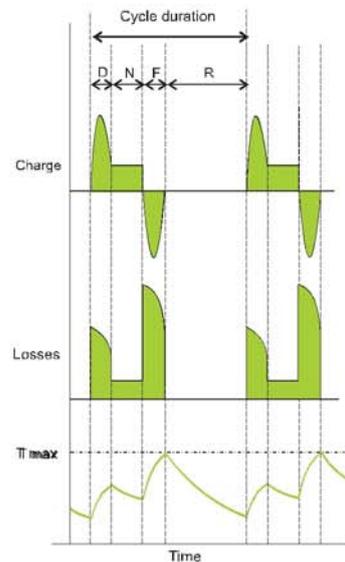
↑ Fig. 18 Tipo de servicio S2



↑ Fig. 19 Tipo de servicio S3



↑ Fig. 20 Tipo de servicio S4



↑ Fig. 21 Tipo de servicio S5

□ Servicio continuo - tipo S1 (⇒ Fig.17)

Func. con carga constante de duración suficiente para alcanzar el eq. térmico.

□ Servicio de duración limitada - tipo S2 (⇒ Fig.18)

Func. con carga constante para un periodo de tiempo dado, menor al requerido para alcanzar el eq. térmico, seguido de una pausa para restablecer el eq. térmico entre la máquina y el líquido refrigerante a unos 20° C.

□ Servicio intermitente periódico - tipo S3 (⇒ Fig.19)

Series de ciclos idénticos, cada uno de ellos con un periodo de func. y de pausa. La corriente de arranque en este tipo de servicio es tal que no tiene un efecto significativo en el calentamiento.

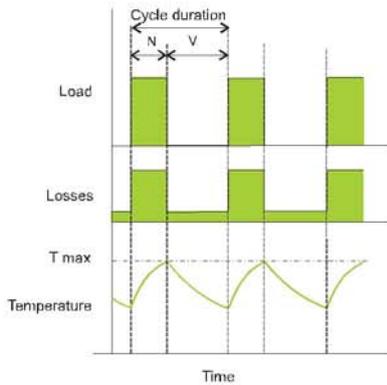
□ Servicio intermitente periódico con arranque - tipo S4 (⇒ Fig.20)

Series de ciclos idénticos, cada uno de ellos con un periodo de arranque significativo, uno de func. a carga constante y una pausa.

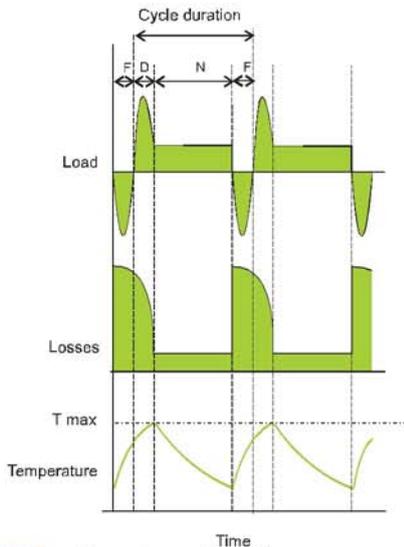
□ Servicio intermitente periódico con frenado eléctrico - tipo S5 (⇒ Fig.21)

Series de ciclos idénticos, cada uno de ellos con un periodo de arranque significativo, uno de func. a carga constante, uno de frenado eléctrico y una pausa.

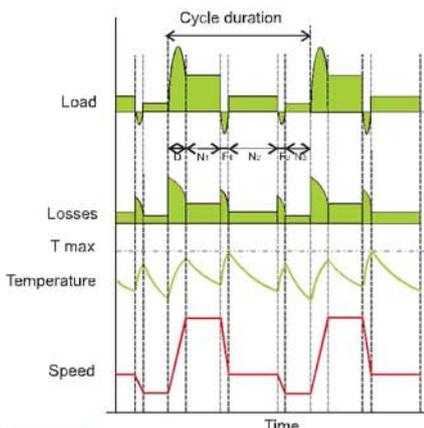
# 4. Arranque y protección de motores de CA



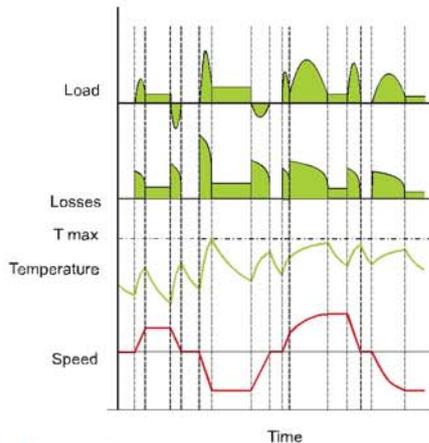
↑ Fig. 22 Tipo de servicio S6



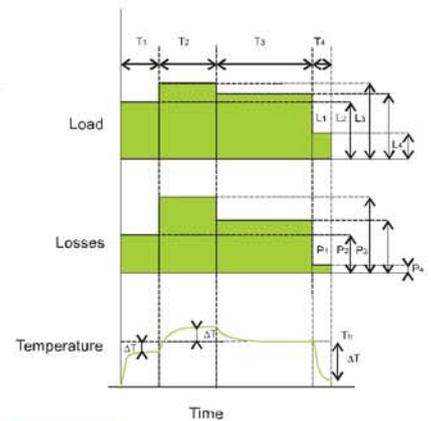
↑ Fig. 23 Tipo de servicio S7



↑ Fig. 24 Tipo de servicio S8



↑ Fig. 25 Tipo de servicio S9



↑ Fig. 26 Tipo de servicio S10

## □ Servicio continuo periódico con carga intermitente - tipo S6 (⇒ Fig.22)

Series de ciclos idénticos, cada uno de ellos con un periodo de func. a carga constante y uno de func. sin carga. No existen pausas.

## □ Servicio continuo periódico con frenado eléctrico - tipo S7 (⇒ Fig.23)

Series de ciclos idénticos, cada uno de ellos con un periodo de arranque, uno de func. a carga constante y uno de frenado eléctrico. No existen pausas.

## □ Servicio continuo periódico con variaciones relacionadas de carga y de velocidad - tipo S8 (⇒ Fig.24)

Series de ciclos idénticos, cada uno de ellos con un periodo de func. a carga constante a una velocidad de rotación preestablecida, seguido de uno o más periodos de func. a carga constante a otras velocidades (por ejemplo, cambiando el número de pares de polos). No existen pausas.

## □ Servicio con var. no periódicas de carga y velocidad - tipo S9 (⇒ Fig.25)

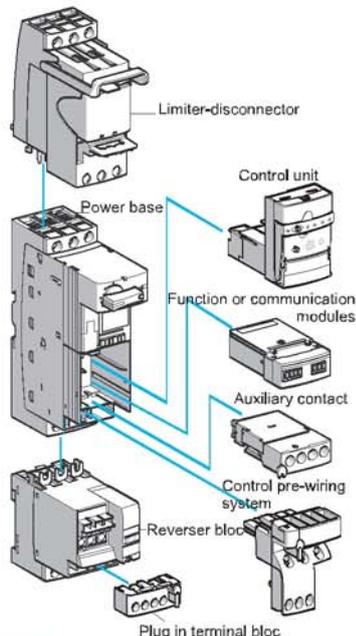
Servicio donde la carga y la velocidad normalmente varían de forma no periódica dentro de un rango de func. permitido. Este servicio a menudo incluye sobrecargas que pueden superar ampliamente la carga completa.

## □ Servicio con regímenes constantes distintos - tipo S10 (⇒ Fig.26)

Servicio con, al menos, cuatro valores distintos de carga (o valores de carga equivalente), cada uno de ellos de duración suficiente para alcanzar el eq. térmico. La carga mínima de un ciclo de carga puede ser cero (func. sin carga o pausa).

# 4. Arranque y protección de motores de CA

## 4.3 Unidades de arranque motor multifunción



↑ Fig. 27 Tesys U

Con los cambios en los requerimientos del usuario, las unidades de arranque motor han evolucionado considerablemente en los últimos años. Los nuevos requerimientos incluyen:

- productos más pequeños para reducir el tamaño del equipamiento,
- soluciones sencillas para problemas de coordinación,
- menos referencias de componentes,
- cableado rápido y sencillo para reducir costes de mano de obra,
- funciones automatizadas a precios asequibles,
- necesidades de comunicación y conexiones de buses de campo.

En 1983, la gama Telemecanique Integral fue la primera respuesta a estas demandas. Fue el primer producto que ofrecía las siguientes funciones en un solo paquete:

- seccionamiento,
- conmutación,
- protección contra sobrecargas y cortocircuitos con las prestaciones de los mejores dispositivos del mercado, (ver la sección de protección de motores para más detalles).

Veinte años más tarde, la técnica ha avanzado y ahora Schneider Electric ofrece Tesys U. Este novedoso producto representa un avance considerable en la construcción de equipamiento.

Asegura una coordinación total, esto es, el dispositivo no puede fallar una vez rearmado. Comparado con una solución convencional, el número de referencias se divide por 10, se ahorra un 60% de cableado y un 40% de espacio.

La ilustración (⇒ Fig.27) muestra un Tesys U con algunas de sus opciones.

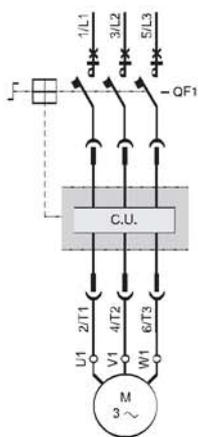
Como la gama Integral, ofrece las principales funciones de las unidades de arranque motor, y además funciones de diálogo avanzado y conmutación que pueden ser usadas para nuevos esquemas muy económicos. Tesys U tiene una "base de potencia" con funciones de seccionamiento, conmutación y protección. Es éste el elemento base que realiza las siguientes funciones básicas.

### ■ Funcionamiento en un sentido

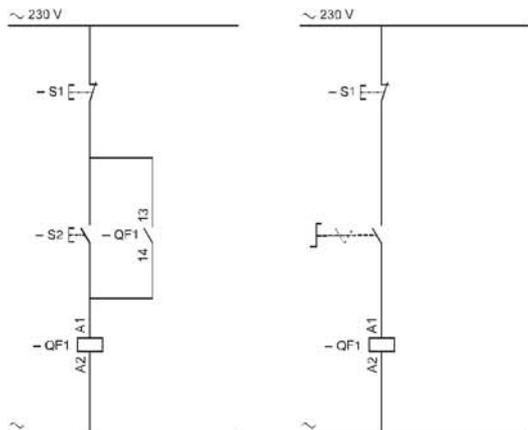
El esquema (⇒ Fig.28) muestra la constitución interna del producto. La "base de potencia" incluye todos los componentes requeridos para el seccionamiento, la protección contra cortocircuitos y sobrecargas y la conmutación de la potencia.

La "base de potencia" se usa para construir los siguientes esquemas clásicos sin componentes adicionales:

- Control por 3 cables (⇒ Fig.29),
- Control por 2 cables (⇒ Fig.30).



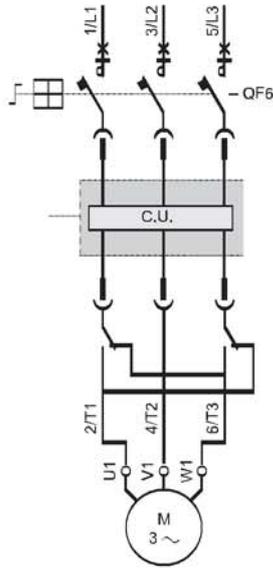
↑ Fig. 28 Esquema de un Tesys U



↑ Fig. 29 Control por 3 cables

↑ Fig. 30 Control por 2 cables

## 4. Arranque y protección de motores de CA



↑ Fig. 31 Tesys U con módulo de inversión de marcha (principio de funcionamiento)

### ■ Funcionamiento en dos sentidos

Las figuras 31 y 32 ilustran la base de potencia y del módulo de inversión que se puede conectar al lado del producto o directamente sobre el mismo para obtener un producto compacto.

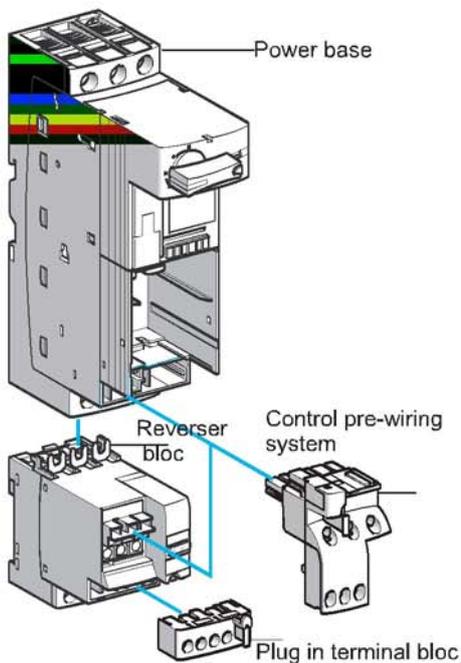
La "base de potencia" controla la parada/encendido, la protección térmica y por cortocircuito.

El inversor nunca conmuta en carga, por lo que no hay ningún tipo de desgaste eléctrico.

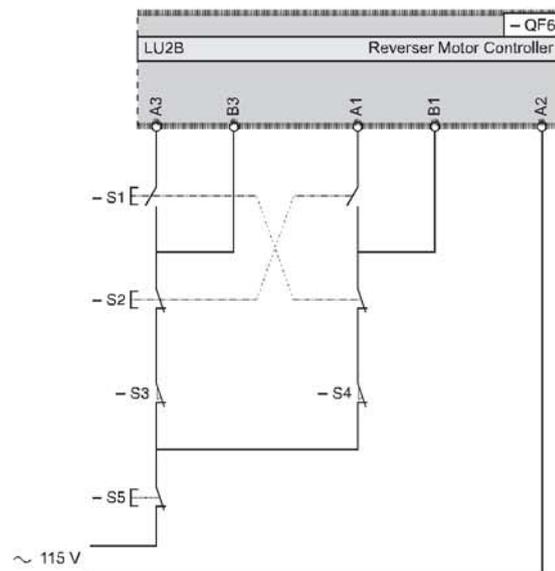
No hay necesidad de bloqueos mecánicos puesto que el electroimán es biestable y el contacto del inversor es inaccesible por lo que su posición no puede ser cambiada de ninguna manera.

Un ejemplo de control por 3 cables puede verse en la (⇒ Fig.33).

4



↑ Fig. 32 Tesys U con módulo de inv. de marcha



↑ Fig. 33 Ejemplo de un Tesys U usado con función de inversión de marcha

## 4. Arranque y protección de motores de CA

### 4.4 Protección de motores

Todo moto eléctrico tiene unos límites de funcionamiento. Superar estos límites podría llegar a destruirlo junto con el sistema que acciona; el efecto inmediato es la interrupción del funcionamiento del mismo y las pérdidas económicas asociadas.

Este tipo de receptor, que transforma la energía eléctrica en energía mecánica, se puede convertir en el origen de incidentes eléctricos o mecánicos.

- **Incidentes eléctricos**
  - picos de corriente, bajadas de tensión, desequilibrio y pérdida de fases que provocan variaciones en la corriente absorbida.
  - cortocircuitos donde la corriente puede alcanzar niveles que pueden destruir el receptor.
- **Incidentes mecánicos**
  - bloqueo del rotor, sobrecargas momentáneas o prolongadas que incrementan la corriente absorbida por el motor y que sobrecalientan sus devanados.

El coste derivado de estos incidentes puede ser elevado. Incluye pérdidas de producción, pérdida de materias primas, reparación del equipamiento de producción, costes de no-calidad y retrasos en entregas. La necesidad económica de los negocios para ser más competitivos implica reducir los costes derivados de las paradas y de la no-calidad.

Estos incidentes además pueden tener un impacto negativo en la seguridad de las personas que están en contacto directo o indirecto con el motor.

La protección es necesaria para evitar estos incidentes, o como mínimo mitigar su impacto y prevenir que dañen el equipamiento y que perturben la red eléctrica. Aísla el equipamiento de la red eléctrica a través de un dispositivo de corte que detecta y mide cualquier tipo de variación eléctrica (como es el caso de la tensión, la corriente, etc.).

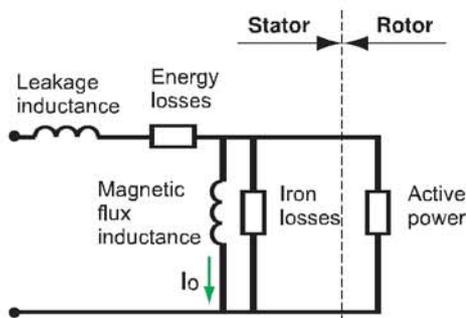
- **Cada unidad de arranque motor debería incluir**
  - protección contra cortocircuitos, para detectar y cortar corrientes anormales (por norma general, 10 veces superiores a la corriente nominal  $I_n$ ) tan rápido como sea posible,
  - protección contra sobrecargas para detectar corrientes que superan un valor de  $10 I_n$  y abrir el circuito de potencia antes de que el motor se caliente, dañando el aislamiento.

Estas protecciones se aseguran mediante dispositivos especiales como fusibles, disyuntores y relés de sobrecarga o por dispositivos integrales con un rango de protecciones.

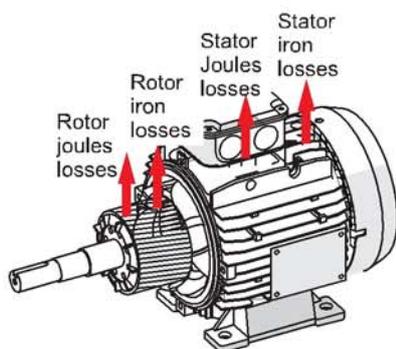
*La protección contra los fallos de tierra, que integra la protección de personas y la seguridad contra incendios, no se trata aquí ya que normalmente es parte de la distribución eléctrica en equipamientos, talleres o edificios enteros.*

## 4. Arranque y protección de motores de CA

### 4.5 Pérdidas de energía en el motor



↑ Fig. 34 Esquema equivalente de un motor asíncrono



↑ Fig. 35 Pérdidas en un motor de CA

	$\Delta t$	T max
Clase B	80°K	125°C
Clase F	105°K	155°C
Clase H	125°K	180°C

↑ Fig. 36 Clases de aislamiento

#### ■ Esquema equivalente de un motor

Un motor asíncrono de jaula de ardilla se puede representar por el esquema de la (≅ Fig.34).

Parte de la potencia eléctrica suministrada al estator se transmite al eje como potencia mecánica.

El resto se transforma en calor en el motor (≅ Fig. 35):

- pérdidas por Joule en los devanados del estator (Joule),
- pérdidas por Joule en el rotor debido a las corrientes inducidas en él (ver la sección de motores),
- pérdidas en el hierro (rotor y estator).

Estas pérdidas dependen del uso y de las condiciones de funcionamiento (ver la sección de arranque motor) y provocan el calentamiento del motor.

Los fallos debidos a la carga, a la tensión de alimentación o a ambos pueden casuar un sobrecalentamiento peligroso.

#### ■ Clases de aislamiento

La mayoría de maquinaria industrial cumple con la clase F. Ver la tabla situada más abajo (≅ Fig.36).

La clase F permite el calentamiento (medido con el método de variación de resistencia) hasta 105°K y las temperaturas máximas en los puntos más calientes de la máquina están limitados a 155°C (IEC 85 e IEC 34-1). Para condiciones específicas (en particular a elevada temperatura y humedad), la clase H es la más adecuada en tales casos.

Las máquinas de calidad están dimensionadas de tal manera que el calentamiento máximo es de 80°C en condiciones nominales (ambiente a 40°C, altitud menor a 1000m, tensión nominal, frecuencia nominal y carga nominal). Se aplica "derating" cuando se superan estos valores.

Para una clase F, se tiene un margen de seguridad de 25°K para afrontar cualquier desviación respecto de las condiciones nominales de funcionamiento.

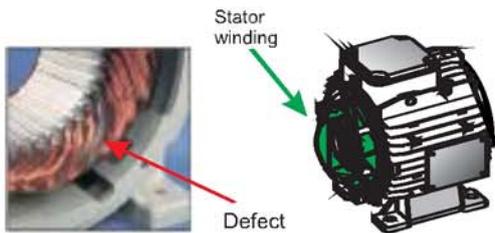
### 4.6 Causas y efectos de los fallos

Hay dos tipos de fallos diferenciados en los motores eléctricos: fallos debidos a causas internas (del mismo motor) y fallos debidos a causas externas.

- Fallos debidos a causas internas
  - cortocircuito entre una fase y la tierra,
  - cortocircuito entre dos fases,
  - cortocircuito en los devanados,
  - sobrecalentamiento de los devanados,
  - barra rota en motores de jaula de ardilla,
  - problemas en los devanados,
  - etc.
- Fallos debidos a causas externas

Sus causas se localizan fuera del motor eléctrico pero sus efectos pueden dañar a éste.

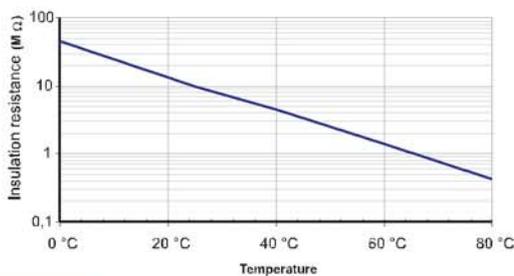
## 4. Arranque y protección de motores de CA



↑ Fig. 37 Los devanados son la parte del motor más vulnerable a fallos eléctricos y a incidentes de funcionamiento

### □ El fallo puede ser causado por

- la red de alimentación
  - fallo de la red,
  - fases invertidas o desequilibradas,
  - caída de tensión,
  - subida de tensión,
  - etc.
- las condiciones de funcionamiento del motor
  - estados de sobrecarga,
  - excesivo número de arranques o frenados,
  - condiciones ambientales severas,
  - inercia de la carga elevada,
  - etc.
- las condiciones de instalación del motor
  - desalineación,
  - desequilibrio,
  - fatiga del eje,
  - etc.



↑ Fig. 38 Temp. de resistencia del aislamiento

### ■ Fallos debidos a causas internas

#### Fallo en el devanado del estátor o del rotor

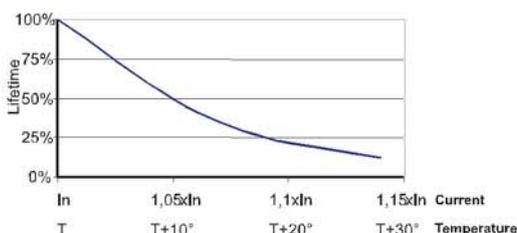
El devanado del estátor en un motor eléctrico consta de conductores de cobre aislados por un barniz. Un "agujero" en este aislamiento puede provocar un cortocircuito permanente entre una fase y la tierra, entre dos o tres fases o entre devanados de una misma fase (⇒ Fig. 37). Sus causas pueden ser eléctricas (ya sean descargas superficiales o subida de tensión), térmicas (sobrecalentamiento) o mecánicas (ya sea vibración o fatiga electrodinámica de los conductores).

Los fallos de aislamiento también pueden ocurrir en los **devanados del estátor** con el mismo resultado: avería del motor.

La causa más común de fallo en los devanados es el sobrecalentamiento. El aumento de la temperatura se debe a una sobrecarga que acaba en un pico de corriente que recorre los devanados.

La curva (⇒ Fig. 38), típica en la mayoría de fabricantes de motores eléctricos, muestra como la resistencia cambia con la temperatura: si la temperatura aumenta la resistencia del aislamiento se reduce, de tal manera que la vida útil de los devanados, y por consiguiente del motor, se reduce drásticamente.

La curva (⇒ Fig. 39), muestra que un incremento del 5% en la corriente, que equivale a un aumento de la temperatura de aprox. +10°, reduce a la mitad la vida útil de los devanados.



↑ Fig. 39 Vida útil de un motor dependiendo de las condiciones de funcionamiento

Así, pues, la protección contra sobrecargas es obligatoria con tal de prevenir el sobrecalentamiento y reducir el riesgo de fallo en el aislamiento de los devanados.

### ■ Fallos debidos a causas externas

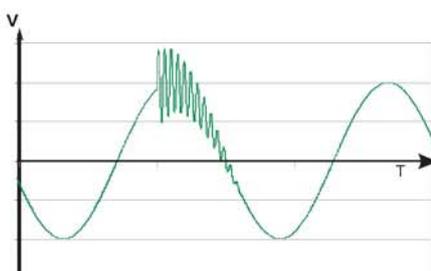
#### Relacionados con la alimentación del motor

##### □ Subidas de tensión

Cualquier tensión de entrada a un dispositivo con un valor de pico que exceda de los límites definidos por una norma o especificación es una subida de tensión (Cuadernos Técnicos de Schneider Electric 151 y 179).

Un exceso de tensión temporal o permanente (⇒ Fig. 40) puede tener diferentes orígenes:

- atmosférico (relámpagos),
- descarga electrostática,
- funcionamiento de receptores conectados a la misma red de alimentación,
- etc.



↑ Fig. 40 Ejemplo de subida de tensión

## 4. Arranque y protección de motores de CA

Las principales características se describen en la tabla ( $\Rightarrow$  Fig. 41).

Tipo de subida	Duración	Tiempo subida - frecuencia	Amortiguamiento
Atmosférica	Muy corta (1 a 10 $\mu$ s)	Muy alta (1000 kV/ $\mu$ s)	Fuerte
Descarga electrostática	Muy corta (ns)	Alta (10 MHz)	Muy fuerte
Funcionamiento	Corta (1ms)	Media (1 to 200 kHz)	Medio
Frecuencia industrial	Larga (>1s)	Frecuencia de la red	Nulo

↑ Fig. 41 Características de los tipos de subidas de tensión

Estas perturbaciones, que se suman a la tensión de la red, pueden producirse de dos maneras:

- modo regular, entre los conductores activos y la tierra,
- modo diferencial, entre los conductores activos.

En la mayoría de casos, las subidas de tensión producen la destrucción del aislante de los devanados, cosa que acaba destruyendo el motor.

### □ Fases desequilibradas

Un sistema trifásico está desequilibrado cuando sus tres tensiones tienen amplitud diferente o no están a 120° entre cada una de ellas.

El desequilibrio ( $\Rightarrow$  Fig. 42) puede ser debido a la apertura de fases, a la presencia de cargas monofásicas próximas al motor o a la red en si misma.

El desequilibrio se puede aproximar según la siguiente ecuación:

$$\text{Desequilibrio}(\%) = 100 \times \text{MAX} [(V_{\text{max}}/V_{\text{moy}} - 1), (1 - V_{\text{min}}/V_{\text{moy}})]$$

donde:

$V_{\text{max}}$  es la tensión más alta,

$V_{\text{min}}$  es la tensión más baja,

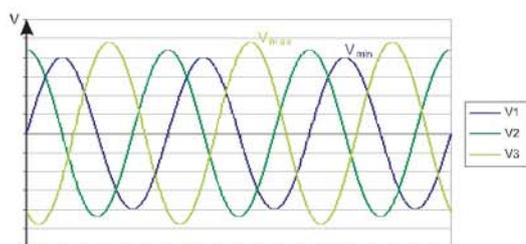
$$V_{\text{moy}} = \frac{(V_1 + V_2 + V_3)}{3}$$

El desequilibrio en la tensión de alimentación del motor genera una componente inversa que crea fuertes corrientes rotóricas que calientan el rotor y acaban provocando el sobrecalentamiento del motor ( $\Rightarrow$  Fig.43 ).

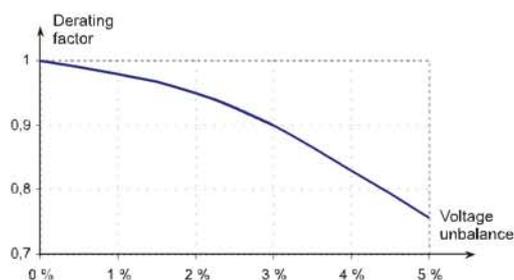
La norma IEC 60034-26 tiene un cuadro de derating para el desequilibrio de tensión ( $\Rightarrow$  Fig. 44) que debería ser aplicado si el fenómeno es detectado o si hay posibilidades de que ocurra. Este factor de derating se utiliza para sobredimensionar un motor para tener en cuenta el desequilibrio o para disminuir la corriente de funcionamiento en relación con su corriente nominal.

Valor de desequilibrio (%)	0	2	3,5	5
Corriente del estátor (A)	$I_n$	$1,01 \times I_n$	$1,04 \times I_n$	$1,075 \times I_n$
Incremento de las pérdidas (%)	0	4	12,5	25
Calentamiento (%)	100	105	114	128

↑ Fig. 43 Efecto del desequilibrio de la tensión en el funcionamiento del motor

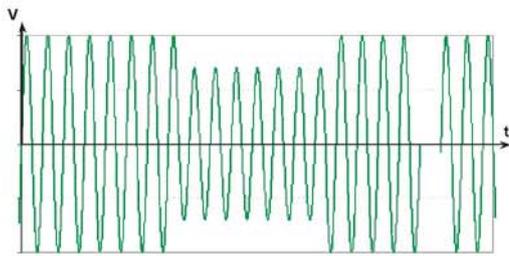


↑ Fig. 42 Tensión trifásica desequilibrada



↑ Fig. 44 Derating del motor de acuerdo con el desequilibrio de la tensión de alimentación

## 4. Arranque y protección de motores de CA



↑ Fig. 45 Ejemplo de una caída de tensión y de un breve corte de tensión

### □ Caídas y cortes de tensión

Una caída de tensión ( $\Rightarrow$  Fig. 45) es una pérdida repentina de tensión en un punto de la red de alimentación.

Las caídas de tensión (norma EN50160) están limitadas a un valor situado entre el 1% y el 90% del valor nominal para 1/2 ciclo de 50 Hz (esto es, de 10 ms a 1 min).

De acuerdo con la misma norma, un corte de corta duración sucede cuando la tensión baja por debajo del 90% de la nominal por menos de 3 minutos. Un corte de larga duración sucede cuando se exceden los 3 minutos.

Un microcorte dura aproximadamente un milisegundo.

Las variaciones de tensión pueden estar causadas por factores externos al azar (fallos en la alimentación o cortocircuitos accidentales) o factores relacionados con la instalación en sí misma (conexión de cargas "pesadas" como grandes motores o transformadores). Pueden tener un efecto radical en el mismo motor.

#### • Efectos sobre motores asíncronos

Cuando la tensión cae, el par en un motor asíncrono (proporcional al cuadrado de la tensión) cae repentinamente y provoca una reducción de la velocidad que depende de la amplitud y de la duración de la caída, la inercia de las masas rotativas y la característica par-velocidad de la carga arrastrada. Si el par desarrollado por el motor cae por debajo del par resistente, el motor se para (se "cala"). Después de un corte, la restauración de la tensión causa un pico de corriente de reacceleración que puede ser próxima a la corriente de arranque.

Si en una instalación existen varios motores, la reacceleración simultánea puede provocar una caída de tensión en las impedancias aguas arriba de la alimentación. Ello prolonga la caída y dificulta la reacceleración (haciéndola más larga y, por tanto, sobrecalentando) o la imposibilita (par desarrollado por debajo del par resistente).

Provocar una subida de tensión rápida ( $\sim 150$ ms) en un motor asíncrono que se está frenando, sin tomar precauciones, puede resultar en una oposición de fases entre la red y la tensión residual mantenida por el motor. En tal caso, el primer pico de corriente puede llegar a ser tres veces la corriente de arranque (de 15 a 20 veces la corriente nominal, según el *Cuaderno Técnico de Schneider Electric 161*).

Todo ello puede tener una serie de efectos sobre el motor que sería deseable evitar a toda costa:

- calentamiento y fatiga electrodinámica en los devanados que puede causar la destrucción de su aislante,
- sacudidas que provocan fatiga mecánica anormal en acoplamientos, desgaste prematuro y rotura.

Pueden afectar otras partes como contactores (desgaste del contacto o soldadura) y provocar que dispositivos de protección corten el suministro parando la cadena de producción o el taller.

#### • Efectos sobre motores síncronos

Los efectos son similares al caso de los motores asíncronos, si bien en el caso de los motores síncronos éstos pueden soportar mayores caídas de tensión (aprox. del 50% o más) sin llegar a calarse, debido a su mayor inercia y al menor impacto de la tensión en el par.

En calarse, el motor para y el procedimiento de arranque debe llevarse a cabo de nuevo, lo que puede ser complejo y llevar un tiempo considerable.

## 4. Arranque y protección de motores de CA

- Efectos sobre motores con variación de velocidad

Los problemas provocados por caídas de tensión en variadores son:

- imposibilidad de suministrar suficiente tensión al motor (pérdida de par, ralentización),
- funcionamiento incorrecto de los circuitos de control alimentados por la red,
- posible sobrecorriente en restaurar la tensión debido a los condensadores de filtrado de los variadores,
- sobrecorriente y corriente desequilibrada en la red de alimentación cuando la tensión cae en una fase.

Los variadores de velocidad normalmente fallan si la tensión cae más de un 15%.

### □ Armónicos

Los armónicos pueden causar daños a los motores de CA.

Las cargas no lineales conectadas a la red causan una corriente no senoidal y una distorsión de la tensión.

Esta tensión se puede descomponer en una suma de sinusoides:

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot t + \phi_h)$$

where :

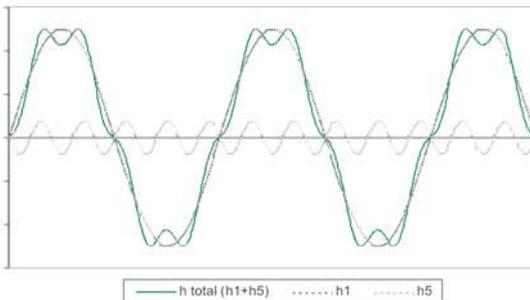
$Y_0$  : continuous component

$h$  : harmonic rank

$\omega$  : pulse ( $2 \cdot \pi \cdot f$ )

$Y_h$  : amplitude of harmonic rank  $h$

$Y_1$  : fundament component



↑ Fig. 46

Onda de tensión con quinto armónico

La distorsión de la señal se mide a través de la Distorsión Armónica Total (DHT):

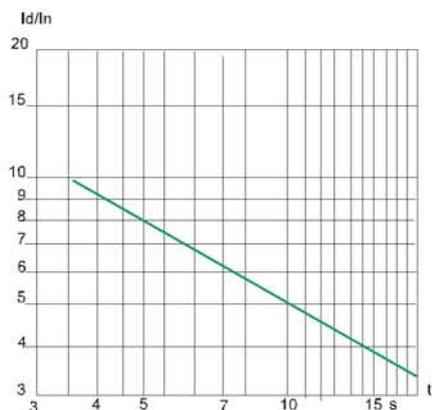
$$DHT(\%) = 100 \times \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{Y_h}{Y_1}\right)^2}$$

La distorsión armónica (⇒ Fig. 46) es una forma de contaminación de la red eléctrica que puede provocar problemas con la DHT por encima del 5%.

Los dispositivos electrónicos de potencia (como variadores de velocidad) son la fuente principal de armónicos en la red. Dado que el motor no es perfecto, puede además generar terceros armónicos.

Los armónicos en el motor incrementan las pérdidas por corrientes de Foucault, lo que implica calentamiento. Además, pueden generar un par pulsante (con lo que ello conlleva: vibraciones, fatiga mecánica, etc.) y ruido, de tal manera que limitan el uso del motor a plena carga (Cuaderno Técnico de Schneider Electric 199).

## 4. Arranque y protección de motores de CA



↑ Fig. 47 Tiempo de arranque en función del cociente entre corriente de arranque y corriente nominal

### ■ Fallos debidos a causas externas de funcionamiento

#### □ Arranque del motor: demasiado largo y/o frecuente

La fase de arranque del motor es el tiempo requerido por el mismo para alcanzar la velocidad nominal de rotación (⇒ Fig. 47).

El tiempo de arranque ( $t_D$ ) depende tanto del par resistente ( $C_r$ ) como del par motor ( $C_m$ ).

$$t_D(s) = \frac{\pi}{30} \cdot J \cdot \frac{N}{C_m - C_r} \text{ donde}$$

J: momento de inercia total de las masas en movimiento,

N: velocidad de rotación del motor.

Dadas sus características intrínsecas, un motor solo puede soportar un número limitado de arranques por hora, normalmente especificados por el fabricante.

Se tiene un tiempo de arranque en función de la corriente de arranque (⇒ Fig. 47).

#### □ Bloqueo del rotor

El bloqueo del motor por causas mecánicas produce una sobrecorriente casi igual a la de arranque. Pero el calentamiento es superior dado que las pérdidas del rotor permanecen en su valor máximo durante todo el bloqueo y la refrigeración se paraliza dado que normalmente funciona con la propia rotación del motor. La temperatura del rotor puede llegar a alcanzar los 350°C.

#### □ Sobrecarga

La sobrecarga de un motor está causada por un incremento del par resistente o por una caída de la tensión de alimentación (>10% de la tensión nominal). El aumento en la corriente consumida causa un calentamiento que reduce la vida útil del motor drásticamente.

### ■ Resumen

El resumen de la tabla de la figura 48 muestra las posibles causas de cada tipo de fallo, los probables e inevitables efectos y las consecuencias si no se toman las oportunas medidas de protección.

En todos los casos, los motores necesitan dos tipos de protección:

- protección contra cortocircuitos,
- protección contra sobrecargas (sobrecalentamiento).

Fallo	Causas	Efectos	Consecuencias en el motor
Cortocircuito	• Entre dos fases, una fase y el neutro, o entre devanados.	• Pico de corriente • Fatiga electrodinámica en los conductores	• Destruc. devanados
Pico de tensión	• Relámpagos • Descarga electrostática • Desconexión carga	• Destrucción aislante devanados	• Destruc. devanados por pérdida aislamiento
Tensión desequilib.	• Apertura de fase • Carga monofásica aguas arriba del motor	• Reducción del par disponible • Incremento pérdidas	• Sobrecalent.(*)
Caídas y cortes de tensión	• Inestabilidad en la tensión de la red • Conexión de grandes cargas	• Reducción del par disponible • Incremento pérdidas	• Sobrecalent.(*)
Armónicos	• Contaminación red por cargas no lineales	• Reducción del par disponible • Incremento pérdidas	• Sobrecalent.(*)
Arranque largo	• Par resistente muy elevado • Caída de tensión	• Incremento del tiempo de arranque	• Sobrecalent.(*)
Bloqueo	• Problema mecánico	• Sobrecorriente	• Sobrecalent.(*)
Sobrecarga	• Incremento del par resistente • Caída de tensión	• Mayor consumo de corriente	• Sobrecalent.(*)

(\*) Y a corto y largo plazo, dependiendo de la severidad y/o frecuencia del fallo, los devanados se cortocircuitan y acaban por destruirse.

↑ Fig. 48 Resumen de posibles fallos en un motor con sus causas, efectos y consecuencias

#### ■ Protección contra cortocircuitos

##### □ Visión general

Un cortocircuito es un contacto directo entre dos puntos con diferente potencial eléctrico:

- *corriente alterna*: contacto entre dos fases, contacto entre fase y neutro, contacto entre fase y tierra, o contacto entre devanados de una fase,
- *corriente continua*: contacto entre dos polos o entre la tierra y un polo aislado de ésta.

Esto puede tener diversas causas: daños en el barniz aislante de los conductores, pérdida, rotura o mal estado de cables, presencia de cuerpos metálicos extraños, presencia de polvo y humedad, penetración de agua y de otros líquidos conductores, cableado incorrecto en el ensamblaje o mantenimiento, etc.

Un cortocircuito provoca una subida repentina de la corriente que puede alcanzar un valor equivalente a centenares de veces el nominal en cuestión de milisegundos, con efectos devastadores y daños severos. Está caracterizado por dos fenómenos.

##### • Un fenómeno térmico

Un fenómeno térmico correspondiente a la energía liberada en el circuito eléctrico por el que circula la corriente de cortocircuito  $I$  durante un tiempo  $t$ , basado en la fórmula  $I^2t$  y expresado en  $A^2s$ . Este efecto térmico puede provocar:

- fusión de los contactos del conductor,
- destrucción de los elementos térmicos de un relé con un bimetalo si la coordinación es de tipo 1,
- generación de arcos eléctricos,
- destrucción del material aislante,
- incendio en el equipamiento.

##### • Un fenómeno electrodinámico

Un fenómeno electrodinámico entre conductores que produce una fatiga mecánica intensa a medida que la corriente circula y que puede provocar:

- deformación de los conductores que forman los devanados del motor,
- rotura de los soportes aislantes de los conductores,
- repulsión entre contactos (dentro de los contactores) que posiblemente acabe fundiéndolos y soldándolos.

Estos resultados son peligrosos para las instalaciones y para las personas. Por tanto, es imperativo protegerlos con dispositivos de protección que puedan detectar fallos e interrumpir el cortocircuito rápidamente, antes de que la corriente alcance su valor máximo.

Se utilizan generalmente dos dispositivos de protección a tal efecto:

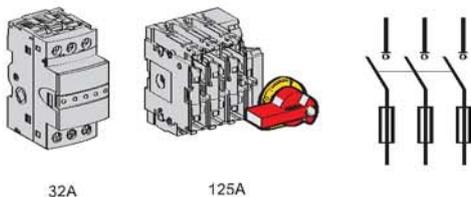
- fusibles, que abren el circuito fundiéndose y que deben ser reemplazados posteriormente,
- disyuntores magnéticos, que automáticamente abren el circuito y que solo requieren ser rearmados para volver a funcionar.

La protección contra los cortocircuitos puede estar integrada en aparatos de funciones múltiples, como los disyuntores motores y los contactores disyuntores.

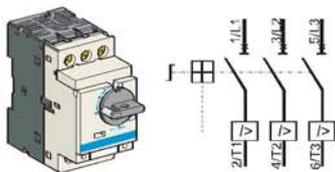
## 4. Arranque y protección de motores de CA

Poder de corte (PdCo)	$\varphi \text{ Cos}$	Poder de cierre (PdCi)
4.5kA <PdCo< 6kA	0.7	1.5 PdCo
6kA <PdCo< 10kA	0.5	1.7 PdCo
10kA <PdCo< 20kA	0.3	2 PdCo
20kA <PdCo< 50kA	0.25	2.1 PdCo
50kA <PdCo	0.2	2.2 PdCo

↑ Fig. 49 Poder de corte y de cierre para dispositivos de protección según la norma IEC 60947-2



↑ Fig. 50 Fusibles montados en portafusibles



↑ Fig. 51 Disyuntor magnético GV2-L (Telemecanique) y su esquema

### Definiciones y características

Los parámetros de los dispositivos de protección contra cortocircuitos son:

- poder de corte: valor máximo estimado de corriente de cortocircuito que se puede interrumpir con una tensión y en unas condiciones determinadas,
- poder de cierre: valor máximo de corriente que se puede establecer con su tensión nominal en condiciones determinadas. El poder de cierre es igual a k veces el poder de corte, según se indica en la siguiente tabla (≈ Fig. 49).

### Fusibles

Los fusibles proporcionan una protección fase a fase, con un poder de corte muy elevado y un volumen reducido. Limitan la  $I^2t$  y la fatiga electrodinámica.

Se pueden montar de dos maneras:

- en unos soportes específicos llamados portafusibles,
- en los seccionadores, en lugar de los casquillos o las barretas (≈ Fig. 50).

Nótese que mediante fusibles con percutor instalados en un portafusibles multipolar o en un seccionador portafusibles se puede prevenir además el funcionamiento monofásico.

Los fusibles utilizados para la protección de motores "dejan pasar" las sobrecorrientes debido a la corriente de magnetización de los motores que se ponen en marcha. No son adecuados para la protección contra sobrecargas (a diferencia de los fusibles gG) por lo que se necesitará un relé de sobrecarga.

Su calibre debe ser inmediatamente superior a la corriente a plena carga del motor.

### Disyuntores magnéticos

Protegen los circuitos contra los cortocircuitos, dentro de los límites de su poder de corte a través de disparadores magnéticos (un disparador por fase). (≈ Fig. 51).

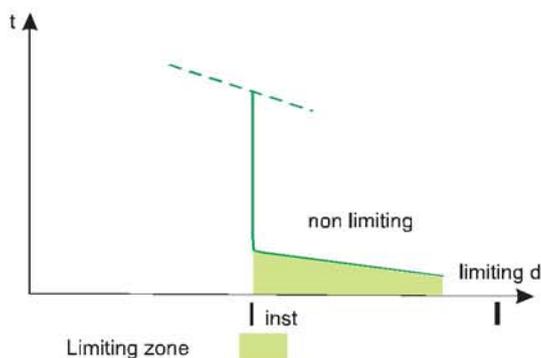
Todos los disyuntores pueden realizar cortes omnipolares: la puesta en marcha de un solo disparador magnético basta para abrir simultáneamente todos los polos. Para corrientes de cortocircuito bajas, los disyuntores magnéticos son más rápidos que los fusibles. Esta protección cumple con la norma IEC 60947-2.

Para detener la corriente de cortocircuito adecuadamente, hay tres imperativos:

- detección temprana de la corriente de fallo,
- separación rápida de los contactos,
- interrupción de la corriente de cortocircuito.

La mayoría de disyuntores magnéticos son también limitadores y es por ello que contribuyen a la coordinación (≈ Fig. 52). Su reducida velocidad de apertura interrumpe la corriente de cortocircuito antes de que ésta llegue a su amplitud máxima.

Permite atenuar los efectos térmicos y electrodinámicos, proporcionando así una mejor protección a los cables y al aparellaje.



↑ Fig. 52 Curvas de disparo de los disyuntores magnéticos

## 4. Arranque y protección de motores de CA

### ■ Protección contra sobrecargas

#### □ Visión general

Los fallos más habituales en las máquinas son las sobrecargas, que se manifiestan a través de un aumento de la corriente absorbida por el motor y de ciertos efectos térmicos. El calentamiento normal de un motor con una temperatura ambiente de 40°C depende del tipo de aislamiento que utilice. Cada vez que se sobrepasa la temperatura límite de funcionamiento, los aislantes se desgastan prematuramente. Conviene señalar, no obstante, que cuando se produce un calentamiento excesivo como consecuencia de una sobrecarga, los efectos negativos no son inmediatos. Por lo tanto, no conlleva necesariamente la parada del motor. Sin embargo, es importante recuperar rápidamente las condiciones de funcionamiento normal.

La correcta protección contra las sobrecargas resulta imprescindible para:

- optimizar la durabilidad de los motores, impidiendo que funcionen en unas condiciones de calentamiento anómalas,
- garantiza la continuidad de explotación de la siguiente manera:
- evitando paradas imprevistas,
- volviendo a arrancar después de un disparo con la mayor rapidez y las mejores condiciones de seguridad posibles para equipos y personas.

Las condiciones reales del entorno (que son temperatura, altitud y servicio normalizado) son un requisito para determinar los valores de funcionamiento del motor (potencia y corriente) y la protección contra sobrecargas (⇒ Fig.53) adecuada. Los valores de funcionamiento los da el fabricante.

Altitud m	Temperatura ambiente						
	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	55°C	60°C
1000	1.07	1.04	1.00	0.96	0.92	0.87	0.82
1500	1.04	1.01	0.97	0.93	0.89	0.84	0.79
2000	1.01	0.98	0.94	0.90	0.86	0.82	0.77
2500	0.97	0.95	0.91	0.87	0.84	0.79	0.75
3000	0.93	0.91	0.87	0.84	0.80	0.76	0.71
3500	0.89	0.86	0.83	0.80	0.76	0.72	0.68
4000	0.83	0.81	0.78	0.75	0.72	0.68	0.64

Los valores de esta table son sólo a título informativo, dado que el derating del motor depende de sus dimensiones, de su clase de aislamiento, de su estructura, de su nivel de protección, etc.) y varía con el fabricante.

*Nota: El valor de potencia nominal de la placa de un motor lo establece el propio fabricante para servicio continuo S1 (funcionamiento con carga constante de duración suficiente para alcanzar el equilibrio térmico).*

*Como ya se ha visto, existen otros tipos de servicio, como el servicio de duración limitada S2 y los intermitentes periódicos S3, S4 y S5, para cada uno de los cuales el fabricante establece una potencia de funcionamiento diferente a la nominal.*

↑ Fig. 53 Factores de derating del motor en función de las condiciones de funcionamiento

Dependiendo del nivel de protección requerido, la protección contra sobrecargas se puede realizar con relés:

- relés de sobrecarga, térmicos (bilámina) o electrónicos, que ofrecen una protección mínima contra:
  - sobrecargas, controlando la corriente absorbida por cada fase,
  - fases desequilibradas o ausentes, con un dispositivo diferencial,
- relés de sondas para termistancias PTC,
- relés de sobrepasar,
- relés multifunción.

## 4. Arranque y protección de motores de CA

**Recordatorio:** Un relé de protección no abre un circuito. Está diseñado para abrir un dispositivo de corte con la capacidad adecuada para la corriente de fallo, que por norma general es un contactor.

A tal efecto, los relés de protección tienen un contacto de fallo (NC) en serie con la bobina del contactor.

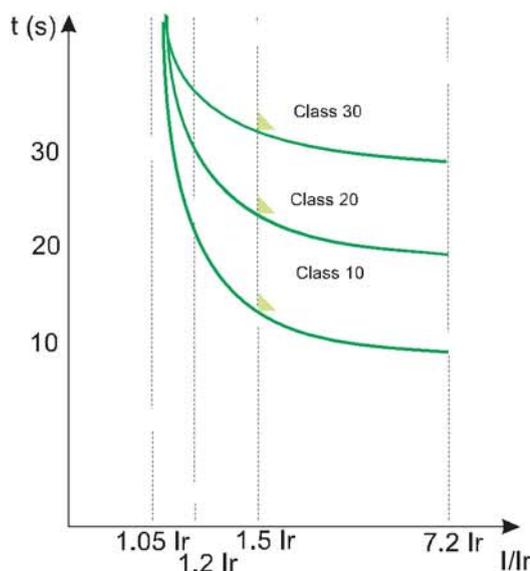
### □ Relés de sobrecarga (términos o electrónicos)

#### • Visión general

Estos relés protegen los motores contra sobrecargas pero deben "ignorar" la sobrecarga temporal que representa el arranque y disparar sólo si éste se prolonga.

Dependiendo de su uso, el arranque motor puede abarcar desde pocos segundos (arranque en vacío, bajo par resistente, etc.) hasta algunas docenas de segundos (gran par resistente, gran inercia de la carga arrastrada, etc.).

De ahí la necesidad de los relés de adaptarse al tiempo de arranque. Para ello, la norma IEC 60947-4-1 define varias clases de relés de sobrecarga según su tiempo disparo (⇒ Fig.54).



↑ Fig. 55 Curvas de disparo de los relés de sobrecarga

Clase	Tiempo de disparo de:				Tolerancia más baja (banda E)
	Frío a $1.05 \times I_r$	Caliente a $1.2 \times I_r$	Caliente a $1.5 \times I_r$	Frío a $7.2 \times I_r$	
10 A	> 2 h	< 2 h	< 2 min	2 s < tp < 10 s	-
10	> 2 h	< 2 h	< 4 min	4 s < tp < 10 s	5 s < tp < 10 s
20	> 2 h	< 2 h	< 8 min	6 s < tp < 20 s	10 s < tp < 20 s
30(*)	> 2 h	< 2 h	< 12 min	9 s < tp < 30 s	20 s < tp < 30 s

(\*) categoría poco usada en Europa pero muy usada en EEUU.  
**Frío** : estado inicial sin carga previa  
**Caliente** : equilibrio térmico alcanzado a  $I_r$   
 **$I_r$**  : valor de reglaje de la corriente del relé de sobrecarga

↑ Fig. 54 Principales clases de disparo de los relés de sobrecarga de acuerdo con la norma IEC 60947-4-1.

La clase del relé debe ser escogida en función de la corriente nominal del motor y del tiempo de arranque estimado.

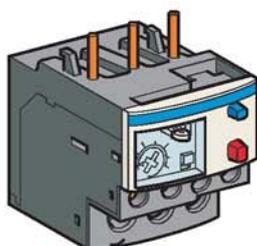
Los límites de utilización se caracterizan por las curvas (⇒ Fig. 55) basadas en el tiempo y el valor de la corriente de reglaje (en múltiplos de  $I_r$ ).

Estos relés tienen una memoria térmica (en algunos casos también hay modelos con memoria electrónica) y se pueden conectar:

- en serie con la carga,
- o, para grandes potencias, en transformadores de corriente situados en serie con la carga.

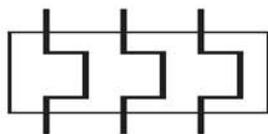
### □ Relés térmicos de sobrecarga (bilamina) (⇒ Fig. 56 y 57)

Mediante su asociación con un contactor, protegen el motor, la red de alimentación y el equipamiento contra sobrecargas prolongadas. Por lo tanto, están diseñados para permitir el arranque normal del motor sin llegar a disparar. Sin embargo, deben ser protegidos de grandes sobrecorrientes por un disyuntor o por fusibles (ver protección contra cortocircuitos).



↑ Fig. 56 Relé térmico de sobrecarga

## 4. Arranque y protección de motores de CA



↑ Fig. 57 Esquema de un relé térmico

El principio de funcionamiento de este relé se basa en la deformación de sus biláminas, formadas por dos metales de coeficientes de dilatación muy diferentes. Tan pronto como una corriente importante recorre los bobinados de calentamiento que rodean las biláminas, éstas se deforman y activan el dispositivo de disparo. El rearme del relé entonces sólo será posible cuando las biláminas se hayan enfriado.

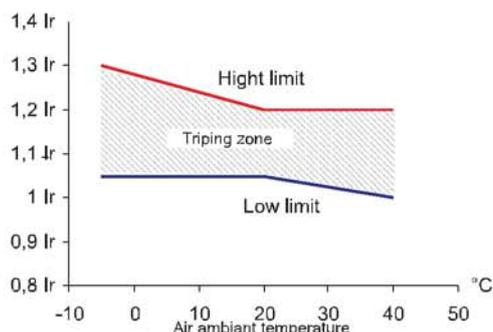
Se pueden utilizar en corriente alterna o continua. Sus características más habituales son:

- tripolares,
- compensados, lo que quiere decir que son insensibles a los cambios de la temperatura ambiente (⇒ Fig.58),
- graduación en "amperios motor": visualización directa en el relé de la corriente indicada en la placa de características del motor.

Además responden en caso de pérdida de una fase: esta es la noción de diferencial. Esta característica evita que el motor trabaje en monofásico y cumple con las normas IEC 60947-4-1 y 60947-6-2 (⇒ tabla Fig. 59).

Tiempo de disparo	Múltiple de la corriente de reglaje
> 2 h	2 polos : 1.0 Ir 1 polo : 0.9 Ir
> 2 h	2 polos : 1.15 Ir 1 polo : 0

↑ Fig. 59 Límite de funcionamiento de un relé térmico diferencial (respuesta a pérdida de fase).



↑ Fig. 58 Zona de disparo para los relés térmicos de sobrecarga compensados según la T ambiente

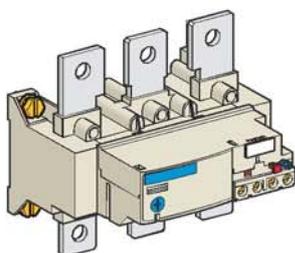
Ampliamente usado, este relé resulta fiable y económico. Está especialmente recomendado si hay riesgo de bloqueo del rotor. Sin embargo, tiene algunas desventajas en cuanto a falta de precisión en lo que se refiere al estado térmico del motor y a las condiciones térmicas del entorno donde está instalado (ventilación, etc.).

### □ Relé electrónico de sobrecarga (⇒ Fig. 60)

Estos relés tienen las ventajas de los sistemas electrónicos y crean una imagen térmica del motor más detallada. A partir de un modelo con las constantes de tiempo térmicas, el sistema calcula de forma continua la temperatura del motor basándose en la corriente que circula por él y en el tiempo de funcionamiento. De ahí que la protección sea más cercana a la realidad y que pueda prevenir disparos repentinos. Los relés electrónicos son menos sensibles a las condiciones térmicas del entorno.

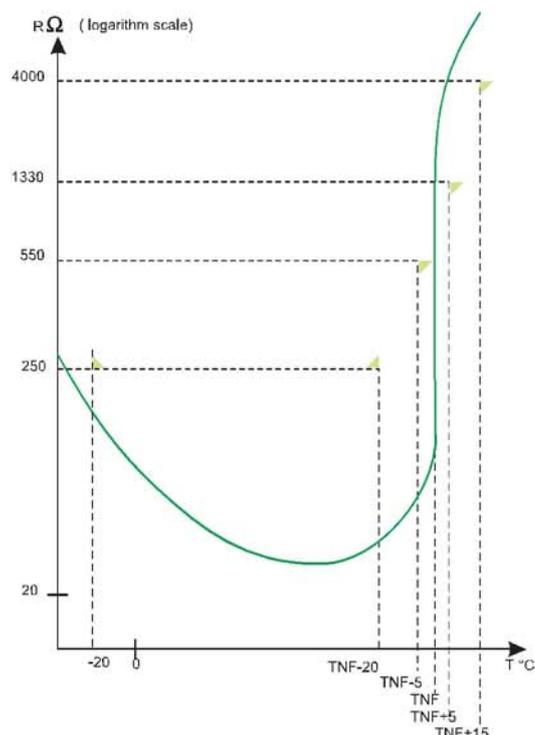
A parte de las funciones usuales de los relés de sobrecarga (protección contra sobrecarga del motor, desequilibrio y ausencia de fase), los relés electrónicos de sobrecarga pueden incluir otras funciones tales como:

- control de temperatura por sondas PTC,
- protección contra bloqueo y sobrepasar,
- protección contra inversión de fase,
- protección contra fallos de aislamiento,
- protección contra funcionamiento en vacío,
- etc.



↑ Fig. 60 Relé electrónico de sobrecarga (LR9F de Telemecanique)

## 4. Arranque y protección de motores de CA



↑ Fig. 61 Límites o "puntos de funcionamiento" de las sondas de termistancias PTC

### □ Relés con sondas de termistancias PTC

Este sistema de protección controla la temperatura real del elemento protegido.

Las sondas miden la temperatura con absoluta precisión ya que, debido a su reducido tamaño, tienen una inercia térmica muy pequeña que garantiza un tiempo de respuesta muy corto.

Controlan directamente la temperatura de los devanados estáticos, lo que les permite proteger los motores contra los calentamientos debidos a sobrecargas, aumento de la temperatura ambiente, fallos del circuito de ventilación, etc.

Constan de:

- una o varias sondas de termistancias con Coeficiente de Temperatura Positivo (PTC) situadas en los mismos devanados o en cualquier otro punto que tiene probabilidades de calentarse (cojinetes, etc.).

Éstas son componentes estáticos con una resistencia que aumenta de repente cuando la temperatura alcanza el umbral llamado Temperatura Nominal de Funcionamiento (TNF) como se muestra en la curva (⇒ Fig.61).

#### • Dispositivo electrónico adicional

Está alimentado por CA o CC para un control continuo de la resistencia de las sondas conectadas a él. Si se alcanza la TNF, el gran incremento en la resistencia es detectado por un circuito que cambia el estado de los contactos de salida.

Dependiendo de las sondas escogidas, este modo de protección puede ser usado para:

- activar una alarma sin detener la máquina (la TNF de las sondas es inferior a la temperatura máxima especificada para el elemento protegido),
- o detener la máquina (la TNF coincide con la temperatura máxima especificada) (⇒ Fig.62).

Sin embargo, para utilizar este modo de protección, es necesario que las sondas se hayan incorporado a los bobinados durante el proceso de fabricación del motor o al realizarse un rebobinado tras un accidente.

La elección de las sondas PTC depende de la clase de aislamiento y de la estructura del motor. Normalmente, esta elección la realiza el fabricante o quien monta el devanado, los únicos que tienen las habilidades requeridas.

Estas dos condiciones significan que la protección con sondas PTC sólo se aplica a equipamiento de alta gama con motores caros.

### □ Relés de sobrepar: protección extra (⇒ Fig.63)

Como complemento a la protección térmica que dan los relés anteriores y las sondas PTC, los relés de sobrepar protegen la cadena cinemática en caso de bloqueo del rotor, etc.

Los relés de sobrepar, a diferencia de la mayoría de relés de sobrecarga, no tienen memoria térmica. Tienen un límite de corriente y una temporización ajustables.

Un relé de sobrepar puede ser usado para proteger los motores contra las sobrecargas cuando el proceso de arranque es demasiado largo o frecuente.

### □ Relés multifunción

#### • Relés electromecánicos o electrónicos

Los relés electromecánicos o electrónicos protegen el motor a partir de la medida de la corriente que entra en éste. Son adecuados para aplicaciones corrientes. Sin embargo, son limitados en lo que se refiere a problemas relacionados con la tensión, la temperatura o con aplicaciones específicas. Igualmente, los nuevos requerimientos del usuario como son la gestión del mantenimiento o de la producción se han convertido en un elemento importante, de tal manera que los fabricantes se dedican a introducir nuevos productos que se pueden ajustar a cada aplicación y ofrecen una protección global tanto para el motor como para la carga arrastrada.



↑ Fig. 62 Dispositivo electrónico adicional (LT3 de Telemecanique) para tres sondas PTC



↑ Fig. 63 Relé de sobrepar (LR97D de Telemecanique)

# 4. Arranque y protección de motores de CA

## • Características

Estos relés han sido desarrollados utilizando sensores de tensión y de corriente, estando estos últimos basados en materiales no magnéticos (sensores Rogowsky, de gran rapidez y con una excelente linealidad); otras tecnologías usadas son:

- tecnología electrónica híbrida numérica y analógica, con una excelente capacidad de tratamiento y almacenamiento de datos,
- buses de campo para intercambiar datos hacia y desde autómatas y otros dispositivos,
- algoritmos precisos para modelizar el motor,
- programas integrados parametrizables.

Esta nueva generación de productos permite reducir los costes derivados del producto desde su concepción (simplificación de la programación de autómatas) hasta su explotación (reducción de costes de mantenimiento y tiempos de paro).

Lo que vendrá a continuación es una breve descripción de las posibles soluciones y una guía de elección básica.

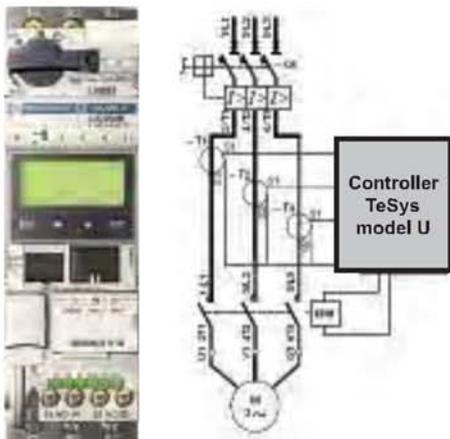
El lector debería consultar la documentación técnica disponible de Schneider Electric para información más detallada.

## • Toda la gama de productos se puede dividir en tres familias

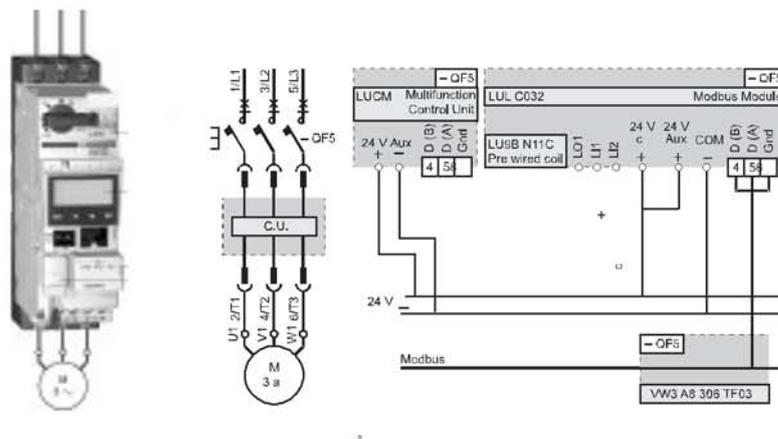
**Solución 1:** el relé multifunción se integra en el arranque motor (≡Fig. 64).

El resultado de todo ello es un producto muy compacto con un número limitado de conexiones.

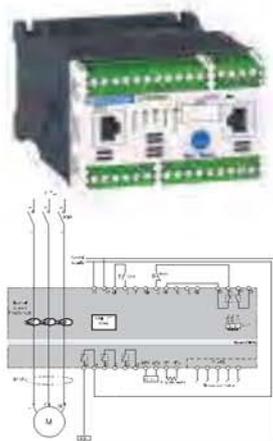
Está limitado a corrientes inferiores a 32A.



↑ Fig. 65 Relé multifunción separado del arranque motor



↑ Fig. 64 Relé multifunción integrado en el arranque motor



↑ Fig. 66 Relé multifunción con múltiples E/S

**Solución 2:** el relé multifunción está separado del arranque motor y utiliza los mismos componentes que el caso anterior (≡Fig. 65). En este caso, se obtiene la posibilidad de conectarse a cualquier arranque motor.

**Solución 3:** el relé multifunción está separado del arranque motor y ofrece múltiples entradas / salidas.

Es la solución más versátil. (≡Fig. 66)

## Guía de elección de relés de protección

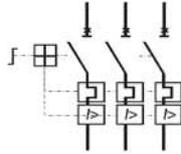
Sus funciones principales quedan reflejadas en la tabla de debajo (≡Fig. 67). Para más información se puede recorrer a las fichas técnicas del fabricante.

## 4. Arranque y protección de motores de CA

Tipo de relés	Relé sobrec. (termorelé o relé elect.)	Relé sondas PTC	Relé de sobrepar	Relé multifunción		
				Integrado en arranque	Separado del arranque	Múltiples E/S
<b>Tipo de control</b>						
<b>Corriente</b>						
Clases de protección	10 y 20			5 a 20	5 a 20	5 a 30
Sobrecorriente	++		+++	+++	+++	+++
Fallo de tierra						
Desequilibrio de fases	++			++	++	+++
Bloqueo mecánico durante y/o después del arranque	+		++	++	++	+++
Funcionamiento en vacío				módulo	módulo	+++
<b>Tensión y potencia de alimentación</b>						
Desequilibrio de tensión						+++
Ausencia de fase						+++
Inversión de fase						+++
Bajada de tensión						+++
Sobretensión						+++
Potencia y factor de potencia						+++
<b>Temperatura</b>						
Sondas PTC				módulo	módulo	+++
Sondas PT100				módulo	módulo	+++
<b>Funciones numéricas</b>						
Tabla de la verdad				3 E/S	10 E/S	10 a 20 E/S
Temporizador						++
<b>Modo de arranque</b>						
Directo				+++	+++	+++
Convertidor de frecuencia				+++	+++	+++
Estrella-triángulo				+++	+++	+++
"Part winding"					+++	+++
<b>Funcionamiento / mantenimiento</b>						
Diagnóstico				+	+	+++
Histórico				módulo	módulo	+++
<b>Enlaces / comunicación</b>						
Display local	+			módulo	módulo	+++
Display remoto (bus de comunicación)				módulo	módulo	+++
Control remoto (bus de comunicación)				módulo	módulo	+++

† Fig. 67 Tabla de las protecciones de motores

## 4. Arranque y protección de motores de CA



↑ Fig. 68 Disyuntor motor GV7 (Telemecanique) y su esquema

### ■ El "disyuntor motor" (disyuntor magnetotérmico)

#### □ Visión general

El "disyuntor motor" es un disyuntor magnetotérmico que protege el motor contra cortocircuitos y sobrecargas abriendo rápidamente el circuito donde existe el fallo. Es la combinación de un disyuntor magnético y de un relé de sobrecarga. Cumple con las normativas de la Comisión Electrotécnica Internacional IEC 60947-2 y 60947-4-1 (⇒ Fig.68).

En estos disyuntores, los dispositivos magnéticos (protección contra cortocircuitos) tienen un límite no ajustable, usualmente con un valor de 10 veces la corriente máxima de reglaje de los dispositivos térmicos.

Los dispositivos térmicos (protección contra sobrecargas) están compensados para tener en cuenta las fluctuaciones de la T ambiente. El límite de protección térmica se puede ajustar en el frontal de la unidad. Su valor debe coincidir con la corriente nominal del motor a proteger.

En todos estos disyuntores, la coordinación (tipo II) entre los elementos térmicos y la protección contra cortocircuitos está construida en su interior.

Además, en posición abierta, la distancia entre contactos en la mayoría de estas unidades es la adecuada para asegurar el aislamiento. También tienen un dispositivo de bloqueo para más seguridad.

#### □ Curvas de disparo

Un disyuntor motor se caracteriza por su curva de disparo, que representa el tiempo que tarda en actuar en función de la corriente (múltiple de  $I_r$ ).

La curva se divide en cuatro zonas (⇒ Fig. 69) :

- zona de funcionamiento normal ❶. Si  $I < I_r$ , no hay disparo,
- zona de sobrecarga térmica ❷. El disparo se asegura con la característica "térmica"; cuanto más grande es la sobrecarga, menor el tiempo de disparo. Las normas se refieren a ello como "tiempo inverso",
- zona de fuertes corrientes elevadas ❸, monitorizada por la característica "magnética instantánea" o de "cortocircuito", instantánea (menor a 5ms),
- y en algunos disyuntores (electrónicos), una zona intermedia ❹ monitorizada por la característica "magnética temporizada" con una función de retardo (de 0 a 300ms). Las normas se refieren a esto como "retardo independiente", que evita el disparo accidental durante el encendido con picos de corriente de magnetización.

Sus límites son:

$I_r$ : corriente de reglaje para la protección contra cortocircuito; debe coincidir con el valor de la corriente nominal ( $I_n$ ) del motor a proteger,

$I_m$ : corriente de disparo de la protección magnética temporizada,

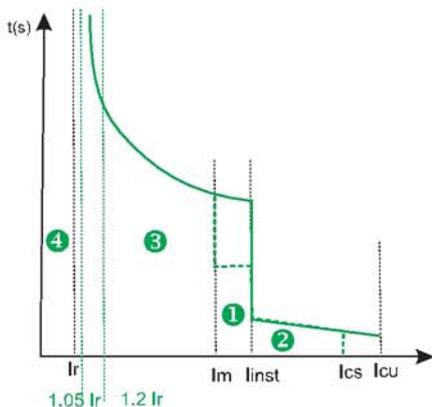
$I_{inst}$ : corriente de disparo de la protección magnética instantánea. Esto puede abarcar de 3 a 17 veces  $I_r$  pero normalmente ronda los 10  $I_r$ ,

$I_{cs}$ : capacidad de corte nominal en cortocircuito,

$I_{cu}$ : máxima capacidad de corte en cortocircuito.

### ■ Conclusión

La protección de motores es una función esencial para asegurar la continuidad del funcionamiento de las máquinas. La elección de los dispositivos de protección se debe hacer con sumo cuidado. El usuario deseará elegir dispositivos que incluyan comunicaciones electrónicas para prevenir cualquier fallo. De esta manera se mejora enormemente la detección de anomalías y la velocidad con la que se restaura el servicio.



↑ Fig. 69 Zonas de funcionamiento de un disyuntor magnetotérmico