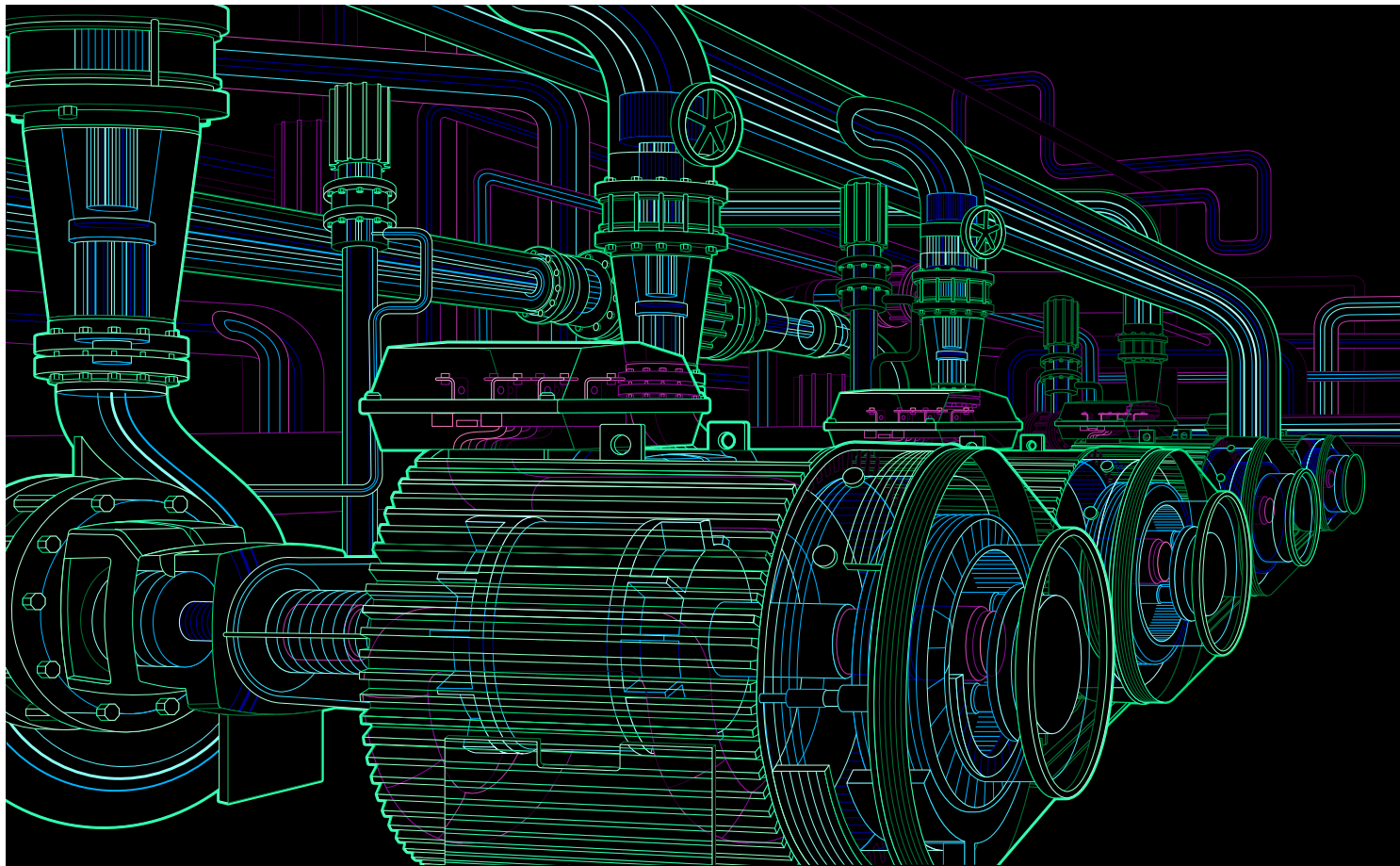




Cuaderno de aplicaciones técnicas nº 6

El motor asíncrono trifásico

Generalidades y oferta de ABB para la coordinación de las protecciones

Power and productivity
for a better world™



El motor asíncrono trifásico

Generalidades y oferta de ABB para la coordinación de las protecciones

Índice

Introducción 2

1 El motor asíncrono trifásico

1.1 Tipos y usos 3

1.2 Estructura del motor asíncrono 4

2 Protección y maniobra del motor asíncrono

2.1 Principales definiciones normativas de carácter general 6

2.2 Principales prescripciones normativas relativas a la coordinación 8

2.2.1 Arranque normal y pesado 8

2.2.2 Coordinación de tipo 1 y tipo 2 9

3 Principales modalidades de arranque de un motor asíncrono trifásico con rotor de jaula de ardilla

3.1 Arranque directo 10

3.2 Arranque a tensión reducida 10

3.2.1 Arranque en estrella-triángulo (Y/Δ) 10

3.2.2 Arranque con autotransformador 12

3.2.3 Arranque con reactores o resistencias estáticas 12

3.2.4 Arranque con arrancador suave 13

4 Aparamenta y soluciones ABB para la coordinación

4.1 Consideraciones teóricas sobre la aparatamenta de una coordinación 14

4.1.1 Dispositivos utilizados normalmente y combinaciones posibles 14

4.1.2 Aplicaciones particulares 20

4.1.3 Aparamenta ABB para la coordinación 20

4.2 Interpretación de las tablas ABB para la coordinación de motores 24

5 Identificación de un motor asíncrono: principales parámetros del motor 27

Apéndice A: Teoría del motor asíncrono trifásico 28

Apéndice B: Una primera aproximación a la valoración del tiempo de arranque 30

Apéndice C: Funcionamiento con "falta de fase" y protección térmica 32

Apéndice D: Los distintos tipos de servicio 35

Apéndice E: Indicaciones sobre la coordinación UL 39

Glosario 42

Introducción

Los motores asíncronos trifásicos pueden incluirse entre las máquinas eléctricas más fiables que existen; desarrollan su función durante muchos años con intervenciones de mantenimiento muy reducidas y se adaptan a distintas prestaciones en función de las exigencias, cubriendo tanto aplicaciones de producción como de servicio.

Los motores se utilizan en los sectores industriales más variados, como por ejemplo las industrias alimentaria, química, metalúrgica, papelera, minera o las instalaciones de tratamiento de aguas. Las aplicaciones incluyen máquinas con piezas móviles a velocidad fija o variable, como por ejemplo los sistemas de elevación, como ascensores o montacargas; de transporte, como las cintas transportadoras; los sistemas de ventilación y climatización, como las unidades de tratamiento del aire; sin olvidar el que es probablemente el uso más común: las bombas y los compresores.

Estas indicaciones evidencian por qué el motor asíncrono trifásico puede considerarse como la máquina eléctrica más ampliamente utilizada en el entorno industrial (el consumo de energía de los motores eléctricos constituye aproximadamente el 75% del consumo total del sector industrial). A la luz de estos datos se entiende por qué es tan importante para la economía empresarial y para la mejora de la eficiencia energética en general, potenciar una reducción del consumo eléctrico (el coste de un motor durante su vida útil se debe en aproximadamente un 98% al consumo de energía y en el 2% restante a los gastos de compra y mantenimiento) recurriendo, por ejemplo, a la utilización de accionamientos de velocidad

variable mediante inversores, o bien realizando una corrección del factor de potencia para tener un $\cos\varphi$ idóneo para evitar incurrir en penalizaciones, o de forma aún más directa, utilizando motores de alta eficiencia identificados con la sigla "EFF1", con características constructivas y materiales muy avanzados que permiten reducir el consumo eléctrico hasta el 20%.

El siguiente cuaderno técnico (el sexto dentro de la colección de cuadernos de aplicaciones técnicas de ABB) puede subdividirse principalmente en 5 áreas; empieza con una visión general de la estructura del motor asíncrono, que da paso al análisis de las principales prescripciones normativas relativas a la coordinación. Se proporcionan además informaciones generales sobre las principales modalidades de arranque, continuando posteriormente con una panorámica de los dispositivos que ABB puede ofrecer para realizar el arranque del motor, acompañada de un ejemplo de interpretación de las tablas de coordinación oficiales de ABB. La última parte está dedicada al análisis de algunos de los principales datos de la placa del motor. Los 5 apéndices abordan por su parte los siguientes temas: una aproximación a la teoría del motor asíncrono con el intento de facilitar elementos básicos para comprender su principio funcional; un ejemplo de valoración, en una primera aproximación, del tiempo de arranque en función de las características del motor y de la carga; algunas consideraciones sobre el funcionamiento del motor con falta de fase; una profundización en el concepto de "tipos de servicio" con referencia a las prescripciones normativas; y, por último, una indicación de la coordinación de motores según las prescripciones de la normativa UL.

1 El motor asíncrono trifásico

1.1 Tipos y usos

El motor asíncrono trifásico puede ser:

- con rotor bobinado, llamado también de anillos, o bien
- con rotor en cortocircuito, o más conocido como rotor de jaula de ardilla.

La diferencia principal entre los dos tipos reside en la estructura del rotor; para ser más precisos, en el primer tipo el rotor está constituido por varios devanados como los del estátor, presenta una estructura más compleja y delicada (escobillas que rozan con el rotor, con la posible interposición de resistencias para el control de la fase de arranque) con necesidad de mantenimiento periódico y dimensiones generales elevadas, mientras que el segundo tipo tiene un rotor constituido por barras cerradas en cortocircuito, por lo que, gracias a una mayor simplicidad constructiva, da origen a un tipo de motor muy simple, robusto y económico.

Gracias al desarrollo de la electrónica de control, que permite la regulación de la velocidad de un modo muy simple y eficaz, todas aquellas aplicaciones que priorizaban la utilización de motores sujetos a tener en su propio comportamiento intrínseco la posibilidad de una regulación de la velocidad (motores de corriente continua o motores de anillo) han cedido su puesto a los motores asíncronos, en particular a los de jaula de ardilla, que se utilizan comúnmente para controlar bombas, ventiladores, compresores y muchas otras aplicaciones industriales.

ABB produce y comercializa una gama completa de motores de baja tensión, desde los de aplicaciones simples hasta los de aplicaciones más complejas. ABB ofrece siempre la solución más idónea y rentable, proponiendo motores para todo tipo de usos.

En referencia a las aplicaciones más comunes, puede identificarse un ámbito de aplicaciones definido como de "uso general" cuyos motores están destinados a

las aplicaciones de los OEM o fabricantes de equipos originales y que pueden solicitarse directamente a los distribuidores de todo el mundo.

Los motores de esta categoría se caracterizan por una calidad constructiva elevada y tienen como destinatarios preferentes a los fabricantes de ventiladores, bombas, compresores, equipos de elevación, etc.

Satisfacen la clase de eficiencia "EFF2" y también están disponibles en la clase de eficiencia "EFF1" si se desea.

La gama de motores ABB definida como de "uso general" comprende los siguientes tipos:

- Motores estándar con carcasa de aluminio de 0,06 a 95 kW
- Motores estándar con carcasa de acero de 75 a 630 kW
- Motores estándar con carcasa de fundición de hierro de 0,25 a 250 kW
- Motores con protección IP23 de 75 a 800 kW
- Motores de frenado automático de 0,055 a 22 kW
- Motores monofásicos de 0,065 a 2,2 kW
- Motores integrados con inversor de 0,37 a 2,2 kW

Los motores ABB están provistos de la marca CE y cumplen con las principales normas internacionales y nacionales del sector (también reconocidas por la Comisión Electrotécnica Internacional, IEC), por ejemplo las normas IEC 60034-1, IEC 60034-2, IEC 60034-8 e IEC 60034-12, referentes a los aspectos de tipo eléctrico, y las normas IEC 60034-5, IEC 60034-6, IEC 60034-7, IEC 60034-9, IEC 60034-14 e IEC 60072, para el sector mecánico.

1.2 Estructura del motor asíncrono

Para comprender mejor cómo está estructurado un motor asíncrono trifásico, proporcionamos a continuación una breve descripción de las principales partes que componen el mecanismo de rotación y en las que se generan los fenómenos eléctricos de los que deriva su funcionamiento.

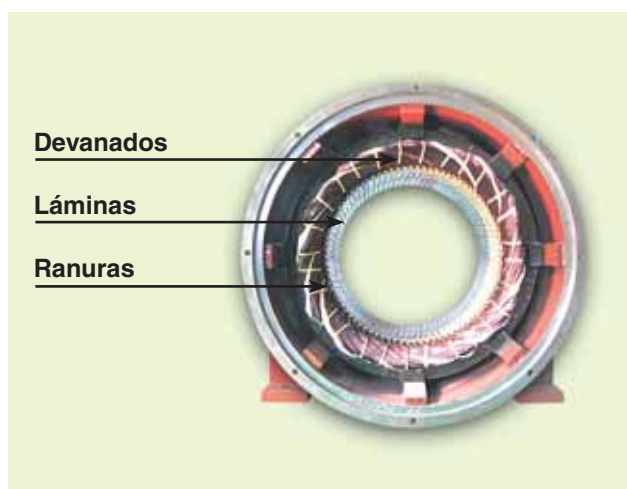
El primer elemento que describimos es el estátor, que se puede definir como el conjunto de las partes fijas cuya función es sostener, al menos parcialmente, la máquina, pero fundamentalmente constituye la parte del circuito magnético que contiene los devanados inductores alojados en las ranuras adecuadas a ese fin y en correspondencia con su superficie interna.

El estátor (representado en la figura 1) está constituido por láminas de una aleación de acero al silicio o de acero macizo aisladas entre sí. De su estructura depende todo lo concerniente a los flujos magnéticos variables en el tiempo que provocan pérdidas por histéresis (ligadas a la magnetización no lineal del material) y por corrientes parásitas inducidas.

En las ranuras adecuadas en la estructura de las láminas se insertan tres devanados primarios (cada uno de ellos constituido por más devanados interconectados de distinta forma), a los que se aplica la tensión de alimentación y que generan el campo magnético.

Los devanados estatóricos trifásicos pueden conectarse en estrella o en triángulo, algo que es posible con motores dotados de 6 bornes, permitiendo alimentar un mismo motor con tensiones trifásicas de redes distintas. Por ejemplo, la doble indicación podría ser 230 VΔ - 400 VY o 400 VΔ - 690 VY, donde el símbolo Y o Δ se refiere a la conexión de los devanados del estátor y

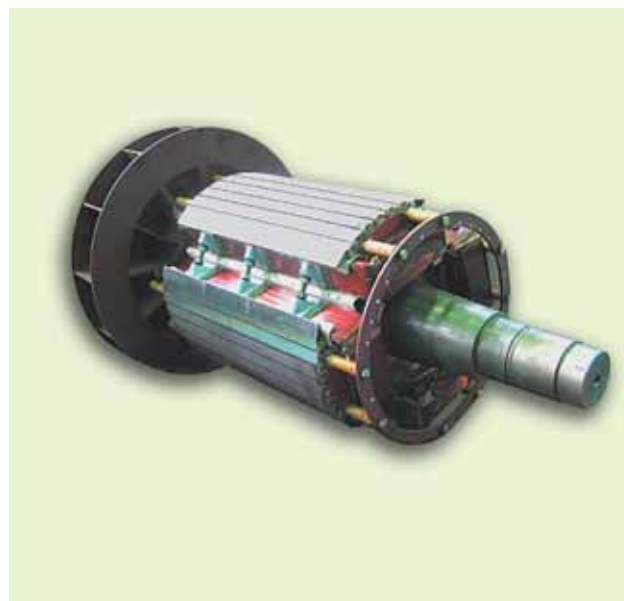
Figura 1: Estátor de un motor asíncrono trifásico



se entiende por ejemplo para el segundo caso (400 VΔ - 690 VY) que los devanados del motor conectados en Δ pueden conectarse a una red trifásica a 400 V (tensión concatenada, o sea, entre fase y fase), mientras si para el mismo motor la conexión de los devanados del estátor se realiza en Y, el mismo motor puede conectarse a una red de alimentación a 690 V (los devanados en Y serán sometidos a la tensión de red reducida $\sqrt{3}$ veces).

El segundo elemento es el rotor, que está alojado en el interior del estátor y constituye el circuito inducido de la máquina. Para un motor de jaula de ardilla, el rotor, tal y como se muestra en la figura 2, está constituido por un sistema de barras conductoras (de cobre o aluminio) paralelas al eje de rotación, inyectadas directamente en las ranuras practicadas a lo largo de toda la periferia externa del núcleo ferromagnético.

Figura 2: Rotor de un motor asíncrono trifásico



Las barras se cierran en cortocircuito con dos anillos conductores posicionados en los extremos, que constituyen también una fijación mecánica para las propias barras. Se obtiene así un rotor extremadamente compacto y robusto, al que se fija también el eje del motor.

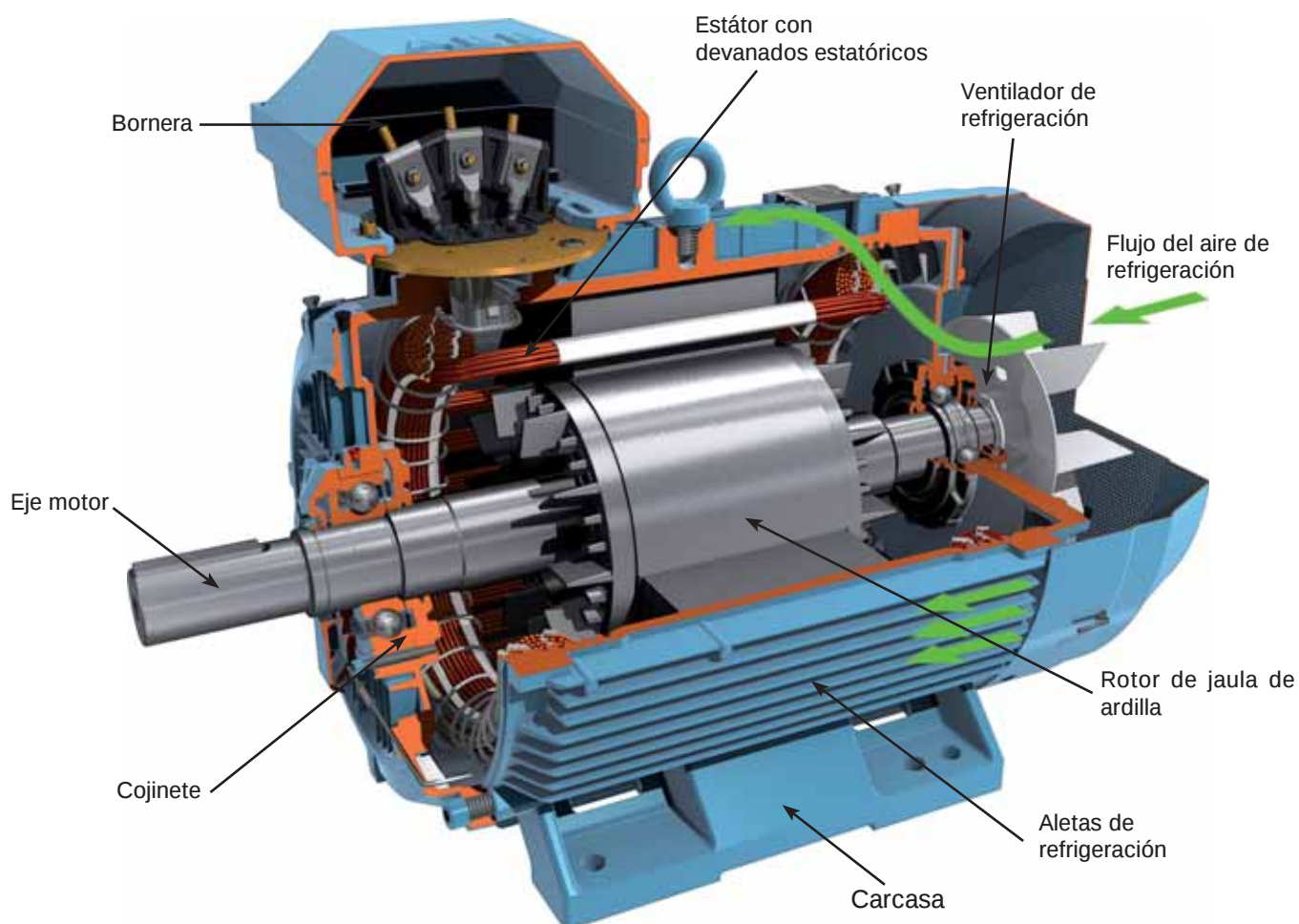
El campo magnético inducido, que constituye el principio funcional del motor, hace girar el eje del motor convirtiendo así la energía eléctrica en energía mecánica.

También existen otros componentes mecánicos presentes en el motor. Los principales son:

- los dos cojinetes montados sobre el estátor con la función de apoyar el eje del motor;
- la carcasa, que con las aletas, elimina el calor producido sobre todo por el estátor y que contiene también la bornera de conexión;
- el ventilador, que proporciona la refrigeración.

En la figura 3 se ofrece una vista de conjunto y otra seccionada del motor asíncrono trifásico de jaula de ardilla.

Figura 3: Vista de conjunto y seccionada de un motor asíncrono



2 Protección y maniobra del motor asíncrono

Un aspecto importante que se ha de tener en cuenta en la selección y la realización del sistema para el arranque y el control del motor es el relativo a la seguridad y a la fiabilidad de la solución realizada. Las principales causas de defecto en los motores se deben al cortocircuito que ocurre, por ejemplo, debido a la humedad, la grasa, el polvo entre los devanados o por una sobrecarga. Las sobreintensidades que resultan del defecto provocan sobretensiones que pueden dañar el motor de forma irreversible y pueden también originar incendios en el entorno.

El arranque constituye por tanto una fase particularmente crítica para el motor y para la instalación que lo alimenta, e incluso el funcionamiento nominal necesita ser monitorizado y protegido adecuadamente frente a posibles anomalías de funcionamiento.

Con este objetivo es necesario e importante dimensionar y escoger correctamente los aparatos eléctricos que realizan el arranque y la maniobra del motor. Empezamos a adentrarnos en este campo identificando la norma que compete a este tema, la IEC 60947-4-1 "*Contactores y arrancadores electromecánicos*", que se aplica a los contactores de corriente alterna y de corriente continua y a los arrancadores cuyos contactos principales están destinados a conectarse a circuitos cuya tensión nominal no supere 1000 Vca o 1500 Vcc.

2.1 Principales definiciones normativas de carácter general

En referencia a la norma IEC 60947-4-1 citamos algunas definiciones de carácter general que ayudan a comprender el significado y la función de los principales componentes eléctricos utilizados para el control de un motor.

Arrancadores para motores de corriente alterna

Asociación de aparatos destinados a: arrancar y acelerar los motores hasta su velocidad de régimen, asegurar su funcionamiento continuo, desconectarlos de la red de alimentación y asegurar la protección de los propios motores y de los circuitos asociados a los mismos contra sobrecargas de funcionamiento. Los relés de sobrecarga para arrancadores, incluidos los basados en la tecnología del estado sólido, deben satisfacer las prescripciones de la presente norma.

Arrancadores directos

Arrancadores que aplican la tensión de línea a los terminales del motor en una sola operación; están destinados a arrancar y acelerar motores hasta su velocidad de régimen. Deben asegurar las funciones de maniobra y protección como en la definición general.

Además, se introducen dos puntualizaciones adicionales basadas en la modalidad de maniobra admitida para el motor y, en particular, para la inversión del sentido de rotación.

Arrancador inversor

Arrancador destinado a provocar la inversión del sentido de rotación del motor, invirtiendo las conexiones primarias, incluso si el motor está en funcionamiento.

Arrancador reversible

Arrancador destinado a provocar la inversión del sentido de rotación de un motor, invirtiendo las conexiones primarias, sólo cuando el motor está parado.

Arrancadores de corriente alterna con tensión reducida

Arrancadores de corriente alterna con tensión reducida destinados a arrancar y acelerar motores hasta su velocidad de régimen, conectando la tensión de línea a los terminales del motor a escalones sucesivos, o aumentando gradualmente la tensión aplicada a los terminales. Deben asegurar las funciones de maniobra y protección como en la definición general. Para controlar las maniobras sucesivas de un escalón al siguiente pueden utilizarse, por ejemplo, contactores, relés temporizados o productos similares.

El tipo de arrancador con tensión reducida más común es el arrancador en estrella-triángulo definido a continuación.

Arrancadores en estrella-triángulo

Arrancadores destinados a arrancar un motor trifásico con los devanados del estátor conectados en estrella y a asegurar el funcionamiento continuo con los devanados del estátor conectados en triángulo. Deben asegurar las funciones de maniobra y protección como en la definición general. Los arrancadores en estrella-triángulo, tratados en la presente norma, no están destinados a la inversión rápida de los motores y, por lo tanto, no se aplica la categoría de utilización AC-4.

La norma también contempla otros tipos de arrancadores (arrancadores con autotransformador, arrancadores reostáticos estáticos) para cuya definición se recomienda consultar la propia norma.

Los arrancadores de los que trata la norma no están previstos generalmente para la interrupción de las corrientes de cortocircuito. Por lo tanto, debe preverse una protección adecuada contra los cortocircuitos en la instalación.

Una vez definido el arrancador en lo que a sus funciones y sus componentes se refiere, la norma proporciona una clasificación y una categorización adicionales a partir de la asociación del arrancador con un dispositivo de protección contra cortocircuitos, haciendo referencia a sus modalidades de montaje y de cableado con el propio arrancador, como se indica a continuación.

Comenzaremos definiendo, conforme a la norma IEC 60947-2 "*Aparatos de baja tensión Parte 2: Interruptores automáticos*", el dispositivo de protección utilizado normalmente, o sea, el interruptor, como:

Aparato mecánico de maniobra capaz de establecer, soportar e interrumpir corrientes en condiciones normales del circuito, así como de establecer, soportar durante un tiempo especificado e interrumpir corrientes en condiciones anómalas del circuito, como por ejemplo las de cortocircuito.

A continuación pasamos a definir y diferenciar el conjunto de los aparatos de maniobra y protección con las siguientes definiciones:

Arrancador combinado

Aparato que consiste en un arrancador y un dispositivo de protección contra cortocircuitos, montada y cableada en una envolvente específica. El dispositivo de maniobra y protección contra cortocircuitos puede ser una unidad combinada con fusibles, un seccionador con fusibles o un interruptor automático con o sin funciones de seccionamiento.

Arrancador protegido

Aparato que consiste en un arrancador y un dispositivo de protección contra cortocircuitos, descubierta o en envolvente, montada y cableada siguiendo las instrucciones del fabricante del arrancador. El dispositivo de maniobra controlado manualmente y el dispositivo de protección contra cortocircuitos pueden estar constituidos por un único dispositivo y pueden tener incorporada también la protección contra sobrecargas.

En la definición del arrancador se habla de aparato de maniobra que se puede identificar en un contactor y de un aparato para la protección contra sobrecargas

de funcionamiento identificable en un relé térmico. Veamos ahora cómo define la norma IEC 60947-4-1 estos dos componentes del arrancador.

Contactor (mecánico)

Aparato mecánico de maniobra con una sola posición de reposo, de accionamiento no manual, capaz de establecer, soportar e interrumpir corrientes en condiciones normales del circuito, incluidas las condiciones de sobrecarga de maniobra.

Relé de protección de sobrecarga

Relé multipolar de protección de sobrecarga térmico que interviene en caso de sobrecorrientes de carácter moderado (sobrecargas) sobre el circuito que alimenta el motor. Para la aplicación a menudo se requiere de un aparato que intervenga incluso en el caso de falta de fase, según las prescripciones especificadas, de manera que se asegure la protección del motor que estuviera funcionando en condiciones anómalas.

La norma especifica diversos campos de aplicación para los contactores y los arrancadores introduciendo el concepto de categorías de utilización o empleo.

Categoría de utilización

Se identifican diversas categorías de utilización caracterizadas por las aplicaciones resumidas en la tabla 1. Cada categoría de utilización identifica prestaciones mínimas bien definidas para el contactor (por ejemplo, campo de aplicación o capacidad nominal de interrupción) según valores de corriente, tensión, factor de potencia o constante de tiempo y condiciones de prueba especificadas en la norma.

Tabla 1: Categorías de utilización

Tipo de corriente	Categoría de utilización	Aplicaciones típicas ⁽¹⁾
Corriente alterna	AC-1	Cargas no inductivas o ligeramente inductivas, hornos de resistencia
	AC-2	Motores de anillos: arranque, paro
	AC-3	Motores de jaula de ardilla: arranque, paro del motor durante la marcha ⁽²⁾
	AC-4	Motores de jaula de ardilla: arranque, frenado a contracorriente, maniobra por impulsos
	AC-5a	Control de lámparas de descarga
	AC-5b	Control de lámparas incandescentes
	AC-6a	Control de transformadores
	AC-6b	Control de baterías de condensadores
	AC-7a	Cargas ligeramente inductivas en aplicaciones domésticas y similares
	AC-7b	Cargas de motores en aplicaciones domésticas
	AC-8a	Control de motores para compresores herméticos de frigoríficos con rearme manual del relé de sobrecarga
	AC-8b	Control de motores para compresores herméticos de frigoríficos con rearme automático del relé de sobrecarga
Corriente continua	DC-1	Cargas no inductivas o ligeramente inductivas, hornos de resistencia
	DC-3	Motores en derivación: arranque, frenado a contracorriente, maniobra por impulsos
		Frenado dinámico de motores de CC
	DC-5	Motores en serie: arranque, frenado a contracorriente, maniobra por impulsos
		Frenado dinámico de motores de CC
	DC-6	Control de lámparas incandescentes

(1) En lo referente al campo de aplicación relacionado con el arranque de los motores, para los arrancadores directos se consideran normales las aplicaciones para las que los arrancadores pertenecen a una o más de las categorías de utilización AC-3, AC-4, AC-7b, AC-8a y AC-8b; para los arrancadores en estrella-triángulo, se consideran de uso común las aplicaciones para las que los arrancadores pertenecen a la categoría de utilización identificable con AC-3.

(2) Normalmente las aplicaciones más comunes prevén arrancadores directos para la maniobra de motores trifásicos asíncronos de jaula de ardilla, por lo que incluso en este caso se hace referencia sólo a la categoría AC-3. Para esta aplicación, la norma admite condiciones de funcionamiento ligeramente diversas a las prescripciones dadas por la categoría AC-3 y admite una utilización para maniobras esporádicas por impulsos o frenados a contracorriente por periodos limitados, como los relativos al posicionamiento de la máquina; durante dichos periodos limitados, el número de estas operaciones no debería superar la cifra de cinco por minuto o de diez en un periodo de 10 minutos.

2.2 Principales prescripciones normativas relativas a la coordinación

Los aparatos que se pueden identificar a partir de las definiciones precedentes y que se utilizan comúnmente para realizar un arrancador protegido son:

- un dispositivo de protección contra cortocircuitos, por lo general un interruptor magnético (pueden utilizarse fusibles),
- un dispositivo de maniobra como el contactor,
- un dispositivo de protección contra las sobrecargas, como el relé térmico.

Estos aparatos deben escogerse adecuadamente para realizar la correcta maniobra y protección del motor pero también de forma coordinada entre sí, para asegurar la protección de los elementos del arrancador con el objetivo de mantener la seguridad de la instalación.

Las prestaciones del dispositivo de protección contra cortocircuitos deben ser adecuadas y verificadas en relación con las características de los componentes utilizados en cada aplicación.

Las verificaciones de protección de estos aparatos las realiza el fabricante en referencia a datos experimentales y características de los productos que no se especifican en los catálogos técnicos o comerciales. Por lo tanto, normalmente el fabricante pone a disposición del encargado del proyecto las tablas de coordinación en las que se indican los componentes que se deben utilizar para obtener las características declaradas para la coordinación.

La utilización de un componente del arrancador (contactor o dispositivo de protección térmica) o de un dispositivo de protección contra cortocircuitos que no responda a las prescripciones del fabricante puede hacer que la coordinación utilizada no sea idónea.

Una coordinación para arranque de motor (entendido como interruptor+contactor+relé térmico), además de referirse a la intensidad nominal del motor que debe maniobrase y de tener validez para una determinada tensión y corriente de cortocircuito, se clasifica como "normal" o "pesado" y de "tipo 1" o "tipo 2".

En una primera clasificación puede decirse que la distinción entre arranque normal o pesado está ligada al tiempo de arranque y a la característica de disparo de la protección térmica, mientras que la existente entre coordinación de tipo 1 o 2 está ligada a cómo el dispositivo de protección contra cortocircuitos protege los aparatos de maniobra (contactor) y de protección contra las sobrecargas (relé térmico externo).

A continuación proporcionamos algunos elementos más detallados para distinguir los diversos tipos de arranque.

2.2.1 Arranque normal y pesado

Una clasificación de los tipos de arranque está ligada a las características de carga y del consiguiente comportamiento del relé térmico. Con relación al hecho de que el relé térmico esté o no compensado térmicamente (normalmente se emplean relés térmicos compensados, es decir, un principio funcional según el cual el desempeño permanece inalterado cuando varía la temperatura de trabajo), la norma indica prescripciones a las que deben responder los relés y que caracterizan la curva de disparo, pero en particular proporciona los tiempos de disparo correspondientes a $7,2 \times I_r$ (I_r = corriente de ajuste de la protección térmica) a partir de los cuales se introduce el concepto de clase de disparo o clase de arranque, como se indica en la tabla 2.

Tabla 2: Clases de arranque

Clases de disparo	Tiempo de disparo T_i [s] para $7,2 \times I_r$	Tiempo de disparo T_i [s] para $7,2 \times I_r$ (banda E)
2	–	$T_i \leq 2$
3	–	$2 < T_i \leq 3$
5	$0,5 < T_i \leq 5$	$3 < T_i \leq 5$
10A	$2 < T_i \leq 10$	–
10	$4 < T_i \leq 10$	$5 < T_i \leq 10$
20	$6 < T_i \leq 20$	$10 < T_i \leq 20$
30	$0,5 < T_i \leq 30$	$20 < T_i \leq 30$
40	–	$30 < T_i \leq 40$

El significado de los términos que aparecen en la tabla se puede entender mejor con las siguientes consideraciones.

El parámetro $7,2 \times I_r$ representa el múltiplo de la corriente ajustada en el relé de protección, y el factor multiplicativo 7,2 lo fija la norma del producto.

Normalmente " I_r " coincide con la intensidad nominal del motor " I_e ", y el valor de $7,2 \times I_r$ puede considerarse la corriente que absorbe el motor durante su fase de arranque.

Las clases de disparo consideradas normalmente y utilizadas más a menudo son las 10A – 10 – 20 – 30 en referencia al tiempo " T_i " de la columna central. Es práctica común hablar de arranque normal al que se asocian las clases de arranque 10A y 10, o de arranque pesado refiriéndose en este caso a las clases 20 y 30.

Las otras clases de disparo y el tiempo de disparo indicado con la banda "E" han sido introducidos recientemente por la norma IEC 60947-4-1 y se caracterizan por un campo de disparo más limitado para elevar el tiempo mínimo de no disparo.

Los límites indicados por " T_i ", que es el tiempo genérico de disparo de la protección térmica, tienen el siguiente significado:

- el límite inferior es el tiempo mínimo por debajo del cual el relé no debe disparar para no interferir en la fase de arranque;

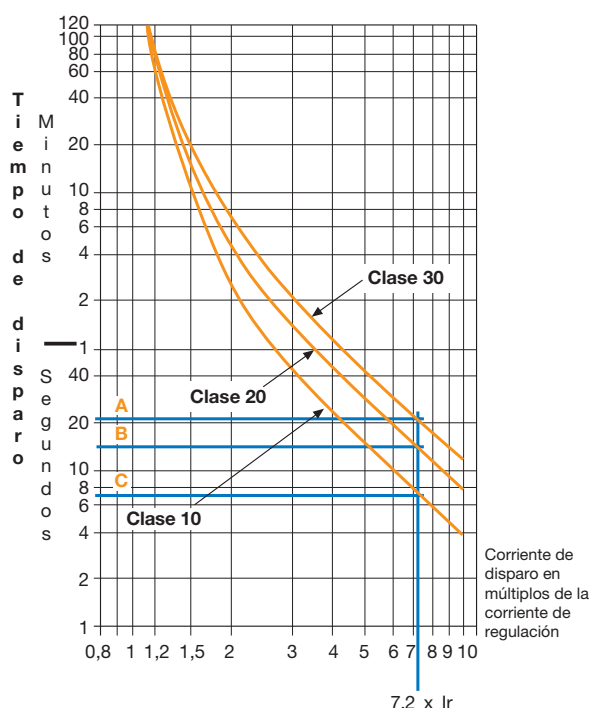
- el límite superior es el tiempo en el que el relé debe disparar con seguridad. Este límite se fija en referencia a las características estándar de la máquina que permiten a los devanados del estátor o al motor en general soportar la corriente de arranque y los efectos térmicos generados por la misma durante tiempos relativamente breves.

Con un simple ejemplo numérico puede resultar más claro el significado de la información presentada en la tabla. Supongamos que tenemos un motor que se utiliza para una aplicación específica que necesita de un tiempo de arranque de 5 s; la elección de un dispositivo de protección térmica que forme parte de la clase de disparo 10A y 10 no sería idónea, ya que teóricamente en la fase de arranque a 2 s o 4 s podría ya intervenir, por lo que se debe escoger necesariamente un relé de la clase 20 que no interviene hasta los 6 s, consintiendo el arranque completo de la máquina.

A continuación mostramos en la figura 4 un ejemplo típico de curvas de protección de un relé para el arranque de motores; de su análisis se desprende la correspondencia entre el valor del tiempo de disparo "Ti" y la clasificación de pertenencia a las distintas clases 10A – 10 – 20 – 30 que caracteriza al relé.

De hecho, podemos ver por ejemplo cómo en correspondencia con $7,2 \times I_r$ (se recuerda el valor fijado por la norma), el relé declarado en la clase 30 tiene un tiempo de disparo de alrededor de 23 s (punto A), concorde por tanto con las indicaciones de la anterior tabla 2.

Figura 4: Curvas de disparo de un relé térmico para diversas clases de arranque



Las características de la carga que deberá arrastrar el motor, el tipo de motor y la modalidad de arranque son elementos que influyen en el tiempo de arranque y, en consecuencia, en la elección del dispositivo de protección térmica. De forma puramente indicativa y para proporcionar una indicación ligada a las aplicaciones reales, podemos decir que las hélices de maniobra de embarcaciones, compresores y bombas centrífugas pueden formar parte de lo que se ha definido como arranque normal (por lo tanto, con protección térmica de clase 10 o 10A), mientras que, por ejemplo, los ventiladores centrífugos, las mezcladoras, los agitadores y los molinos formarían parte de lo que se ha definido como arranque pesado (es decir, con protección térmica de clase 30). Nótese lo importante que es establecer las condiciones de trabajo para una elección correcta de la máquina y del dispositivo de protección a fin de poder obtener las condiciones de funcionamiento óptimas.

2.2.2 Coordinación de tipo 1 y tipo 2

Los tipos de coordinación que permite la normativa, en lo referente al comportamiento del dispositivo de protección contra cortocircuitos de los elementos del arrancador, se clasifican en "tipo 1" y "tipo 2".

La coordinación de tipo "1" en condiciones de cortocircuito tolera los daños del contactor y del relé de sobrecarga que podrían no funcionar más adelante sin una reparación o sustitución de piezas. Sin embargo, es necesario que no provoquen daños a las personas o a las instalaciones, como en el caso de partes de componentes proyectadas fuera de la envolvente.

La coordinación de tipo "2" en condiciones de cortocircuito asume el riesgo de la soldadura de los contactos, con tal de que éstos puedan separarse fácilmente (p. ej., mediante un destornillador) sin deformaciones significativas. Es necesario que el contactor o el arrancador no provoquen daños a las personas o a las instalaciones y que estén capacitados para reanudar el funcionamiento una vez recuperadas las condiciones normales.

De la definición de los dos tipos de coordinación se puede deducir que la "coordinación de tipo 1" permite la utilización de aparataje con magnitudes inferiores, lo que conlleva un ahorro inicial de gastos y dimensiones, en detrimento de un elevado grado de seguridad y, por lo tanto, con sucesivos costes de mantenimiento y sustitución en caso de averías. La "coordinación de tipo 2" responde a cánones de seguridad más elevados y su superior coste inicial puede amortizarse considerando el hecho de que, en caso de avería, los aparatos de maniobra y protección podrían volver a funcionar sin ser sustituidos.

3 Principales modalidades de arranque de un motor asíncrono trifásico con rotor de jaula de ardilla

Independientemente de las clasificaciones antes mencionadas, el arranque de un motor asíncrono trifásico, para las aplicaciones en las que no se necesite una variación de la velocidad de las máquinas, puede realizarse mediante diversas soluciones de instalación que se diferencian por el modo en que se les aplica la tensión a los devanados del estátor y por el valor de los parámetros eléctricos y mecánicos que producen, por ejemplo, esfuerzos más o menos violentos sobre la máquina eléctrica, pero que ponen a disposición parámetros de par inicial de arranque de valores muy diversos.

Comenzaremos entrando más en detalle en lo que respecta a los tipos de arranque más comunes.

3.1 Arranque directo

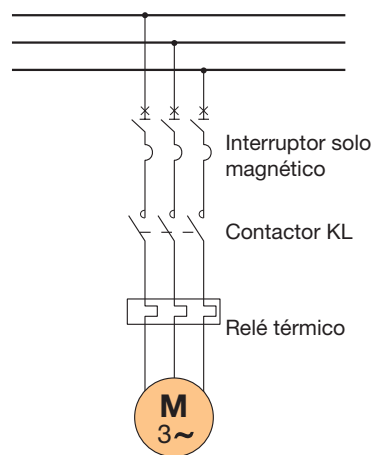
El sistema de arranque directo es quizás el más tradicional y consiste en conectar el motor directamente a la red de alimentación eléctrica ejecutando, por lo tanto, un arranque a plena tensión; a menudo se abrevia con la sigla DOL (Direct On Line, "directo en línea").

El arranque directo representa el sistema más simple y económico para arrancar el motor asíncrono de jaula y es tradicionalmente el más utilizado. Prevé, como se muestra en la figura 5, la conexión directa a la red de alimentación y, por lo tanto, el arranque tiene lugar a plena tensión y con frecuencia constante, desarrollando un par de arranque elevado con tiempos de aceleración de media muy reducidos. Las aplicaciones típicas son relativas a motores de poca potencia incluso con arranque a plena carga.

Estas ventajas llevan intrínsecas algunos problemas, como por ejemplo la elevada corriente inicial de arranque, que puede alcanzar en los primeros instantes valores de hasta 10 ó 12 veces la intensidad nominal, para decrecer después a valores cercanos a las 6 u 8 veces y permanecer en este rango hasta alcanzar la velocidad de par máxima.

Los efectos de dicha corriente pueden identificarse en los elevados esfuerzos electrodinámicos de los cables de conexión al motor y podrían afectar incluso a los devanados del propio motor; además, los elevados pares iniciales de arranque pueden dar lugar a violentas aceleraciones que repercuten en esfuerzos sobre los elementos de transmisión (correas y juntas mecánicas) generando problemas en la distribución con la consecuente reducción de la vida mecánica de los componentes. Finalmente, han de tenerse en cuenta eventuales problemas de naturaleza eléctrica por caídas de la tensión en la línea de alimentación del motor o de la aparatura conectada a la misma.

Figura 5: Esquema del principio de arranque directo



3.2 Arranque con tensión reducida

Los sistemas de arranque con tensión reducida consisten en conectar el motor a la red de alimentación eléctrica indirectamente.

Esto no sólo comporta una reducción de la corriente de arranque, sino también la reducción del par inicial de arranque. Los tipos más comunes de arranque son el arranque con reactores o resistencias estatísticas, el arranque en estrella-triángulo, el arranque con autotransformador y el arranque con arrancador suave, que interviene en la curva de par del motor con el fin de adaptarla a las características de la carga.

3.2.1 Arranque en estrella-triángulo Y/Δ

El arranque en estrella-triángulo es el más conocido y quizás el más utilizado entre los métodos de arranque con tensión reducida y sirve para arrancar el motor reduciendo los esfuerzos mecánicos y limitando las corrientes durante el arranque; por contra, pone a disposición, como ya se ha mencionado, un par inicial de arranque reducido.

Puede utilizarse para motores dotados de una placa con 6 bornes y con doble tensión de alimentación. Resulta especialmente idóneo para arranque en vacío o con cargas de par bajo y constante o ligeramente creciente, como es el caso de ventiladores o bombas centrífugas de poca potencia.

En referencia al esquema eléctrico de la figura 6, la modalidad de arranque prevé la fase inicial de arranque con conexión de los devanados en estrella que se realiza con el cierre del interruptor, del contactor de línea KL y de estrella KY. Tras un periodo de tiempo idóneo y debidamente calibrado se pasa a la conexión de los devanados en Δ a través de la apertura del contactor KY y el cierre de KΔ, que es también la configuración de la

marcha de régimen. Estos aparatos se ven afectados por corrientes, relativas a las diversas fases de arranque, que son inferiores a la intensidad nominal del motor, como se ilustrará a continuación.

Incluso la protección térmica, que normalmente se coloca aguas abajo del nodo de conmutación Y/ Δ , deberá fijarse para una corriente inferior respecto de la intensidad nominal del motor. Además, la protección térmica instalada en esta posición es sensible a las corrientes de tercer armónico que se generan por la saturación del hierro y que permanecen encerradas en el circuito de triángulo. Pasemos a analizar con más detalle las diversas fases del arranque:

Fase de estrella (Y)

Es la fase de arranque en la que los devanados del motor están conectados en estrella y por tanto con tensión $\frac{V_L}{\sqrt{3}}$. La corriente resultante en los devanados del motor y en la línea es $I_{MY} = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times Z_W}$.

Con Z_W se indica la impedancia del devanado.

Tal y como se ha explicado, esta fase del arranque coincide con la fase de aceleración y su duración debe ser tal que se alcance casi la velocidad de régimen.

Una duración demasiado breve no conseguiría obtener la reducción de los esfuerzos que caracteriza a este tipo de arranque y que, por lo tanto, se presentarían en la sucesiva fase de triángulo, reproduciendo condiciones de arranque similares a las del arranque directo.

Fase de conmutación

Es la fase en la que, con las maniobras de apertura y cierre de los contactores específicos, se pasa de la fase de estrella a la de triángulo. Son importantes la duración y la regulación de la conmutación; de hecho, el tiempo de transición debe permitir la extinción del arco eléctrico sobre el contactor de estrella e impedir un cierre prematuro del contactor de triángulo que cause una condición de cortocircuito. Sin embargo, un tiempo excesivamente elevado de paso de Y a Δ provocaría la deceleración del motor, con los consiguientes picos de corriente que se formarían en la fase de triángulo.

La conmutación se regula con temporizadores analógicos o digitales y, a título orientativo, el tiempo de conmutación puede fijarse en aproximadamente 50 ms. En el temporizador se fija también el tiempo de duración de la fase de estrella, es decir, el tiempo de aceleración o de arranque que, con carácter general, puede considerarse una función de la diferencia entre el par medio del motor y el par de resistencia medio del conjunto motor-máquina.

Una buena conmutación, necesaria para que las ventajas que teóricamente caracterizan al arranque Y/ Δ sean efectivas, debe realizarse teniendo también en cuenta el sentido de rotación y la secuencia de las conexiones de

los devanados, que se realizan en los bornes del motor, en el paso de Y a Δ . Si la conmutación tuviera lugar en un momento en el que el magnetismo residual del rotor se encontrase en oposición de fase con el campo magnético generado por la corriente del estátor, la demanda de corriente podría ser a su vez muy elevada, con valores que podrían alcanzar hasta 20 veces la intensidad nominal. Las consecuencias derivadas de una conmutación incorrectamente calibrada afectan, además del motor, al comportamiento de los aparatos destinados a la coordinación, provocando un funcionamiento no idóneo e imprevisible.

Fase de triángulo (Δ)

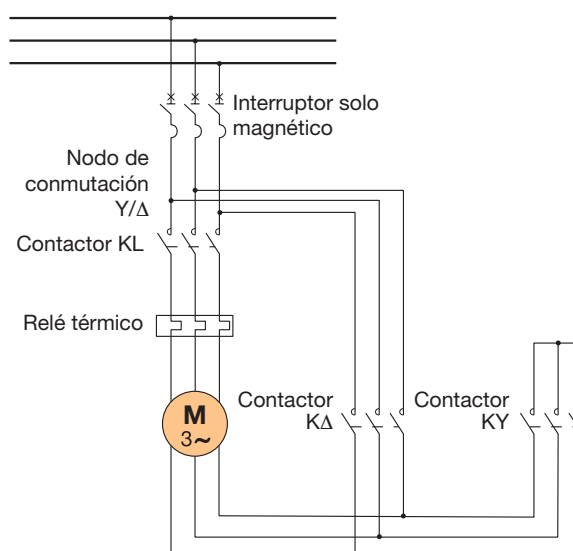
La conmutación que ha tenido lugar continúa en la fase final del proceso de arranque, que representa también la condición de marcha de régimen en la que los devanados de estátor se conectan en triángulo y son sometidos a la tensión total de red V_L y el motor recobra el par completo, mientras que la corriente que atraviesa los devanados es

$$I_{MA} = \frac{V_L}{Z_W}$$

y la corriente que absorbe de la línea (intensidad nominal "I_e" del motor) es

$$I_{LMA} = \frac{V_L}{Z_W} \times \sqrt{3}.$$

Figura 6: Esquema del principio de arranque en estrella/triángulo



Analizando las expresiones de las corrientes y las tensiones antes proporcionadas, se aprecia cómo la fase de arranque en Y tiene lugar a un valor de tensión igual a 0,577 veces la tensión de red V_L y que requiere la absorción (de la línea o en los devanados en Y) de 0,33 veces la corriente que el motor absorbería de la línea si se arrancara con arranque directo y con el motor conectado en triángulo. De la precedente relación relativa a la corriente en la fase de Y a la corriente de línea en la fase de Δ se deduce justamente que $I_{MY} = \frac{V_{LMA}}{3}$.

De las leyes de la electrónica se deduce cómo la reducción de las corrientes absorbidas reducen los esfuerzos electrodinámicos en la misma proporción, mientras que la reducción de la tensión reduce el par inicial de arranque de forma cuadrática (por lo tanto, 3 veces).

Las razones y las características alegadas anteriormente con motivo de la utilización del sistema de arranque en Y/ Δ (es decir, la reducción de la elevada caída de tensión provocada por la corriente inicial de arranque y la reducción del excesivo par inicial de arranque que causaría daños a los acoplamientos de la máquina en servicio), en algunos tratados o comentarios técnicos no se consideran aspectos significativos y reales hasta el punto de ratificar como válido el método de arranque en Y/ Δ .

En cualquier caso no puede negarse el hecho de que este método se utiliza muy frecuentemente en las aplicaciones industriales clásicas que prevén la utilización de motores asíncronos.

3.2.2 Arranque con autotransformador

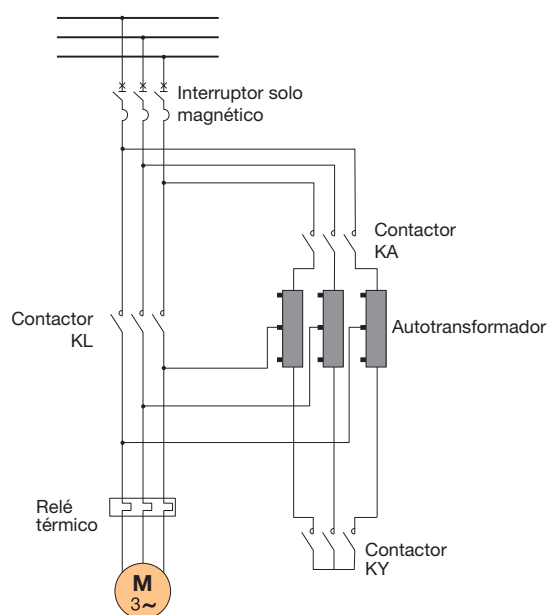
La reducción de la tensión de alimentación se realiza mediante un autotransformador con toma fija o con uno más costoso de varias tomas, o incluso con tensión variable con continuidad.

Durante el arranque con autotransformador, como se aprecia en el esquema de la figura 7, el motor está conectado a una de las tomas del autotransformador (interruptor magnético cerrado, KA cerrado, KY cerrado) que reduce la tensión de red "k veces" y que requiere en el motor una corriente reducida de factor similar al que el motor absorbería si fuese alimentado directamente con toda la tensión. La corriente en el primario del autotransformador, y también en la línea, se reduce "k² veces". Como consecuencia de la reducción de la tensión en el factor "k" veces, también el par inicial de arranque se reducirá "k²" veces respecto del arranque a plena tensión.

Cuando el motor ha alcanzado indicativamente el 80% - 90% de su velocidad de régimen, el contactor KY se abre y el motor continúa siendo alimentado con tensión reducida por la inductancia de los devanados del auto-

transformador. En este momento se cierra el contactor KL y se abre el contactor KA de forma que el motor se alimenta directamente de la red. El arranque con autotransformador se considera bastante costoso, seguramente más que el arranque Y/ Δ , y tiene aplicaciones en motores de jaula de ardilla de potencia media o alta con inercia elevada.

Figura 7: Esquema del principio de arranque con autotransformador



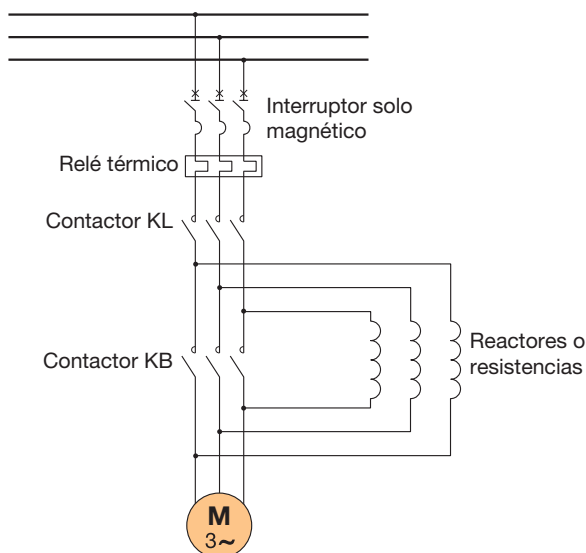
3.2.3 Arranque con reactores o resistencias estáticas

Este tipo de arranque, cuyo esquema de conexión está representado en la figura 8, es idóneo para rotores de jaula de ardilla, y la caída de la tensión se produce por reactores o resistencias colocados en serie con el estátor en la fase de arranque (KL cerrado, KB abierto); consecuentemente, la tensión que alimenta al motor en la fase inicial disminuye "k" veces respecto a la tensión de red, a la que corresponde una disminución del par de "k²" veces. La corriente inicial de arranque queda limitada a la mitad de la que se obtendría con el arranque a plena tensión. Una vez completada la fase de aceleración, los reactores o las resistencias son excluidos (cierre de KB) y el motor vuelve a poseer los parámetros relativos a la tensión plena.

Pueden realizarse incluso más exclusiones graduales de los reactores o de las resistencias mediante comandos temporizados. Este método acarrea algunas consecuencias, presentes en la fase de arranque, como el notable descenso del factor de potencia a causa de las reactancias o un elevado recalentamiento producido por la disipación de potencia en las resistencias.

Es un sistema adoptado típicamente por máquinas con gran inercia que no necesitan de valores de par y corriente particularmente altos durante el arranque.

Figura 8: Esquema del principio de arranque con reactores o resistencias estáticas

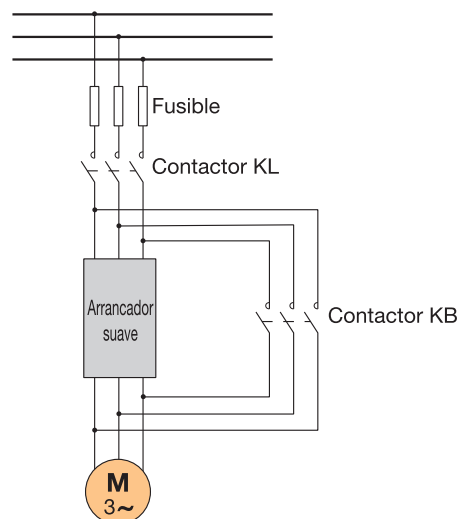


3.2.4 Arranque con arrancador suave

Un método moderno para realizar el arranque, que puede que todavía requiera de una inversión económica inicial considerable, consiste en utilizar arrancadores estáticos electrónicos comúnmente llamados soft starters o arrancadores suaves. La utilización de estos dispositivos, con un esquema de conexión como el de la figura 9, permite reducir la corriente de arranque, determinar el par y fijar el tiempo de arranque; esto hace posible una alimentación muy gradual del motor que incrementa durante todo el procedimiento, a fin de obtener un arranque lineal, evitando esfuerzos eléctricos o en las partes mecánicas que caracterizan en mayor o menor grado los arranques directos y en Y/ Δ . El arrancador suave está constituido principalmente por dos partes: una unidad de potencia y una unidad de mando y control. Los principales componentes de la unidad de potencia son el disipador térmico y los tiristores, controlados por la lógica implementada sobre una tarjeta de control, que constituye la unidad de mando, generalmente con microprocesador. El esquema de conexión típico utilizado es el que se presenta a continuación y que se define como "en línea". A menudo los fusibles pueden sustituirse por un interruptor, pero éste no permite realizar la protección de los tiristores de forma apropiada en caso de cortocircuito; además, cuando el tipo de arrancador suave no incorpora una protección térmica en su interior, es necesario el uso de un relé térmico externo instalado aguas arriba del nodo de bypass. En referencia al esquema de conexión en Y/ Δ , el arrancador suave también podría insertarse en

el interior del nodo de conmutación con una conexión definida "en triángulo". Por lo general, la fase de arranque tiene lugar con KL cerrado y KB abierto de forma que el arrancador suave pueda controlar el arranque; acto seguido tiene lugar el cierre de KB con la exclusión de la parte de potencia interna del arrancador suave, dejando activa la parte de control.

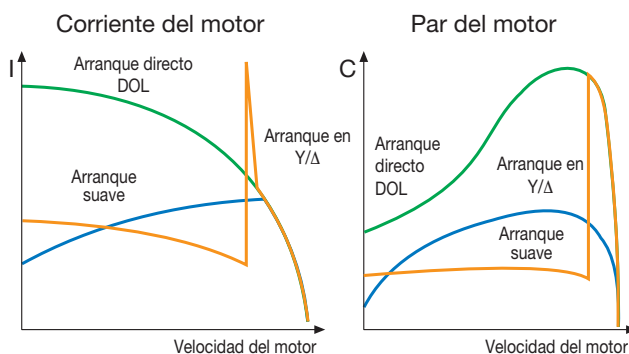
Figura 9: Esquema del principio de arranque con arrancador suave



En cuanto a las modalidades de arranque directo, en estrella/triángulo y con arrancador suave, a continuación ilustramos, en la figura 10, un comportamiento típico de la corriente de arranque y del par requeridos por el motor.

Se aprecia claramente cómo el arranque directo constituye la modalidad más costosa en términos de corriente pero con mayor rendimiento en cuanto al par, y cómo con el arranque en Y/ Δ se corre el riesgo de reducir la corriente de arranque, incluso si, como ya hemos subrayado, en el momento de la conmutación se presenta un valor de pico muy elevado, todo ello con un valor de par inicial discreto. Probablemente el arranque más equilibrado sea el arranque con arrancador suave.

Figura 10: Comportamiento de la corriente y del par para diversas modalidades de arranque



4 Aparamenta y soluciones ABB para la coordinación

4.1 Consideraciones teóricas sobre la aparamenta de una coordinación

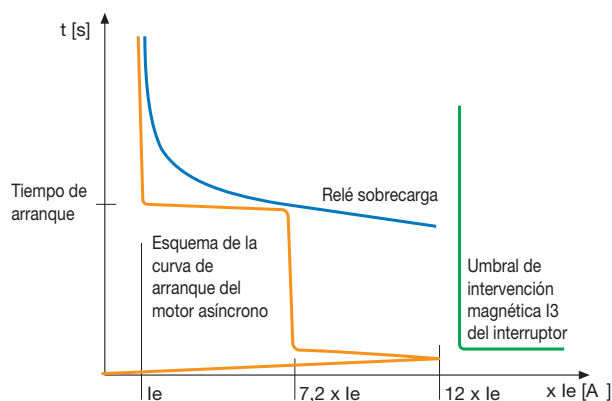
El comportamiento del motor asíncrono trifásico de jaula de ardilla está representado por parámetros significativos, como son:

- intensidad nominal " I_n " ligada a la potencia nominal " P_n " a través del rendimiento y el factor de potencia. La norma IEC 60947-4-1 (con su variante de noviembre de 2006) proporciona una tabla que liga a la potencia del motor un valor de corriente para las diversas tensiones de la instalación. Las intensidades nominales de referencia se determinan para un motor de cuatro polos de jaula de ardilla a 400 V, 1500 rpm y 50 Hz. Las intensidades nominales de empleo para las otras tensiones se calculan sobre la base de estos valores.
- corriente inicial de arranque " I_{ia} " a la que se asigna un valor de aproximadamente 12 veces I_n y representa la corriente máxima requerida por el motor en los primeros instantes de la puesta en servicio.
- corriente de arranque " I_{arr} " a la que se asigna, conforme a la norma IEC 60947-4-1, un valor aproximado de 7,2 veces I_n y representa la corriente requerida en la fase de arranque y que permanece durante el tiempo de arranque.

Estos parámetros, como se ve en el esquema de la figura 11, en principio se asocian a las características de los distintos dispositivos de la coordinación del siguiente modo:

- **la corriente inicial de arranque I_{ia}** influye en la elección del dispositivo de protección, que deberá tener un umbral de intervención magnética idóneo para permitir la fase inicial de arranque. Además de este parámetro, el interruptor deberá poseer el poder de corte idóneo para la corriente de cortocircuito asignada a la tensión de instalación.
- **corriente de arranque I_{arr}** y el tiempo de arranque permiten identificar el tipo de protección térmica idónea para el tipo de servicio requerido; asimismo, el campo de regulación del relé debe ser apropiado para la intensidad nominal del motor.

Figura 11: Esquema de las curvas de arranque del motor, protección térmica y magnética



Además de estas características que deben respetarse, el relé de sobrecarga o el contactor, deben coordinarse con el dispositivo de protección contra cortocircuitos; esto significa asegurar una protección adecuada para los dos dispositivos en caso de cortocircuito para responder a las prescripciones que se dan en la coordinación de tipo 2.

4.1.1 Dispositivos utilizados normalmente y combinaciones posibles

En referencia a la descripción y a la esquematización precedente con la que se ha descrito el comportamiento del motor, relacionado a los dispositivos de mando y protección, la solución que ofrece típicamente ABB prevé la utilización y la combinación de interruptor solo magnético, contactor y relé sobrecarga externo. A continuación describimos algunos elementos que caracterizan los componentes citados:

- interruptor solo magnético

permite disponer de un umbral de intervención magnética I_3 más elevado (hasta 13 veces I_n) respecto del que está disponible en un interruptor termomagnético que, como se ha mencionado, está estandarizado en un valor de 10 veces I_n .

Esto permite afrontar mejor eventuales problemas ligados a la corriente particularmente elevada que el motor absorbe durante los primeros instantes de su fase de arranque sin tener que recurrir necesariamente a calibres superiores del interruptor.

Pueden utilizarse interruptores en caja moldeada de la serie Tmax o bien interruptores automáticos modulares (MCB, por sus siglas en inglés), como por ejemplo los MO325 representados en la figura 12.

Figura 12: Interruptores magnéticos



- contactor

es el aparato (véase la figura 13) destinado a ejecutar las maniobras de conexión/desconexión (encendido/apagado) del motor en condiciones normales, así como a desconectar el motor de la red de alimentación en caso de sobretensiones detectadas por el relé térmico que controla su apertura. Además, el contactor deberá escogerse de modo que pueda soportar, en referencia a la categoría AC-3, la intensidad nominal del motor.

El contactor destinado a la maniobra del motor permite realizar un número de maniobras muy superior al que podría realizar el interruptor si se le solicitase esta tarea.

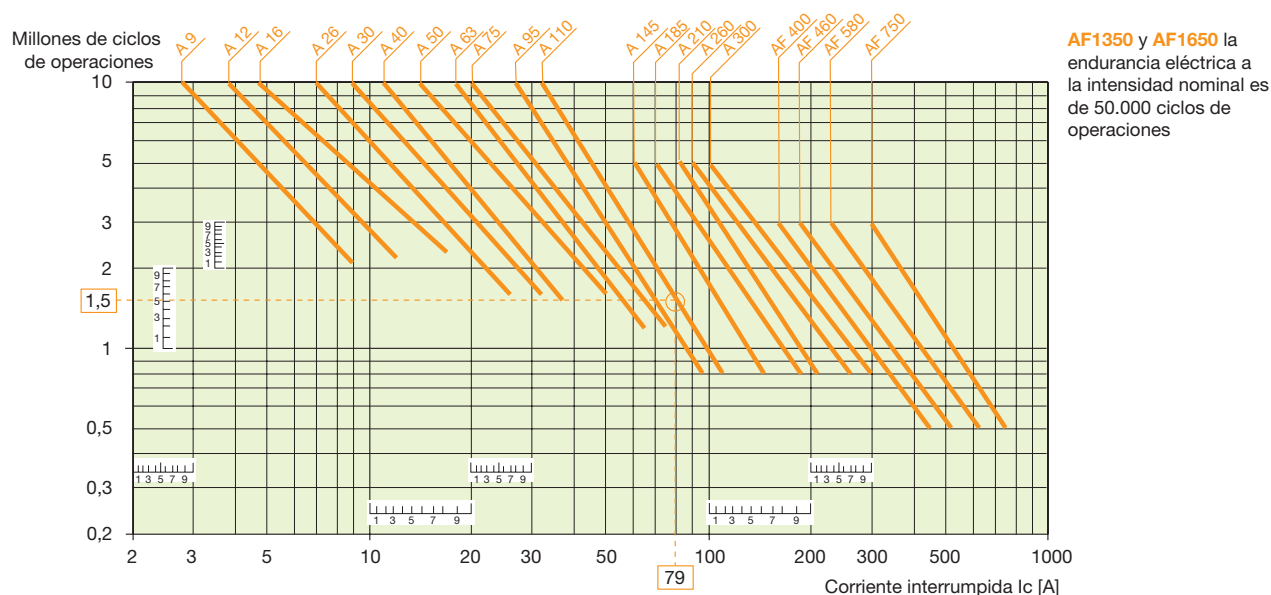
Figura 13: Contactores



Por regla general el contactor permite obtener una vida eléctrica superior a la que sería posible con un interruptor.

La vida eléctrica del contactor puede determinarse con la ayuda de curvas proporcionadas por el fabricante y con validez para condiciones específicas; en el ejemplo que se muestra a continuación, en el hipotético caso de un motor asíncrono trifásico de jaula de ardilla, que a 400 V CA absorbe una corriente de 79 A, se puede determinar el número de maniobras, a partir del gráfico de la figura 14 en correspondencia con la curva del posible contactor utilizado para el arranque (por ejemplo A110 en torno a 1,5 millones).

Figura 14: Curvas de la endurance eléctrica para la categoría AC-3 – tensión < 440 V – temperatura ambiente < 55 °C



- relé de sobrecarga externo

es el dispositivo destinado a realizar la protección contra sobrecargas del motor; suele tener también la función de ordenar la apertura del contactor para las sobrecorrientes inferiores al umbral de intervención magnético del interruptor.

Generalmente se trata de un simple relé externo (o sea, no montado en el interruptor magnético) bimetálico, térmico o electrónico dedicado a la aplicación en cuestión y por lo tanto con curvas de disparo y protección (por ejemplo, compensado térmicamente y sensible a la falta de fase) conformes a la norma IEC 60947-4-1.

Pueden utilizarse también aparatos más complejos con funciones de protección y monitorización más avanzadas que permitan el control remoto, como por ejemplo Insum o UMC. En la figura 15 ilustramos un ejemplo de los distintos tipos de aparatos.

Figura 15: Relés de sobrecarga y UMC



La combinación de los tres aparatos como se ilustra en la figura 16 realizada teniendo en cuenta los conceptos antes mencionados, permite obtener una solución compacta y que responde plenamente a los requisitos tanto de dimensiones generales como de las exigencias de la máquina en la fase de arranque (corriente inicial

de arranque y corriente de arranque) y en la fase de maniobra (número elevado de maniobras) y protección durante el funcionamiento.

Figura 16: Solución compacta con interruptor solo magnético, contactor y relé de sobrecarga



La configuración antes expuesta permite cubrir la mayor parte de las aplicaciones en las que es necesario controlar un motor asíncrono trifásico; de todas formas, también hay disponibles otras configuraciones, como por ejemplo:

- solución con seccionador y fusible

la combinación de estos dos dispositivos, véase la figura 17, se utiliza en sustitución del interruptor solo magnético.

Figura 17: Seccionadores con fusibles



- solución con interruptor dotado de protección térmica y magnética

esta solución, que proporciona protección de sobrecarga y magnética integrada, se realiza con interruptores en caja moldeada de la serie Tmax equipados con relé electrónico PR222MP para el arranque del motor. De esta forma, la protección magnética y la protección térmica, sensible a la falta de fase y con compensación térmica, se consiguen con un único dispositivo (asociando después el contactor de maniobras se obtiene un arrancador extremadamente compacto).

La protección termomagnética que se obtiene con los clásicos interruptores y relés para la distribución, presenta normalmente una curva de protección no del todo idónea desde el punto de vista de la protección térmica y magnética del motor. El relé denominado "motor protection" (protección del motor), como se verá mejor a continuación, permite implementar además protecciones orientadas a gestionar situaciones anómalas que podrían presentarse en los motores.

Una versión más simplificada del PR222MP, y que desempeña las funciones de protección térmica y magnética, es el relé PR221MP que viene equipado

con el interruptor Tmax T2; con esta solución incluso los motores con intensidades nominales relativamente pequeñas pueden protegerse con interruptor en caja moldeada con protección de sobrecarga (conforme a las clases 3E, 5E, 10E y 20E) y magnética incorporada en el interruptor.

La misma solución integrada en el interruptor, entendida como protección magnética simple y protección térmica sensible a la falta de fase y con compensación térmica, puede obtenerse también con los interruptores modulares llamados "manual motor starters" (MMS o arrancadores manuales del motor)", como por ejemplo los MS325.

Con estos interruptores, en la coordinación no se utilizará más el relé de sobrecarga externo, mientras que el contactor sigue presente.

En la figura 18 se evidencia la compacidad de la solución que se obtiene utilizando un interruptor en caja moldeada con PR222MP o un interruptor miniatura termomagnético directamente conectados al único dispositivo de maniobra.

Figura 18: Realización de soluciones racionales y compactas



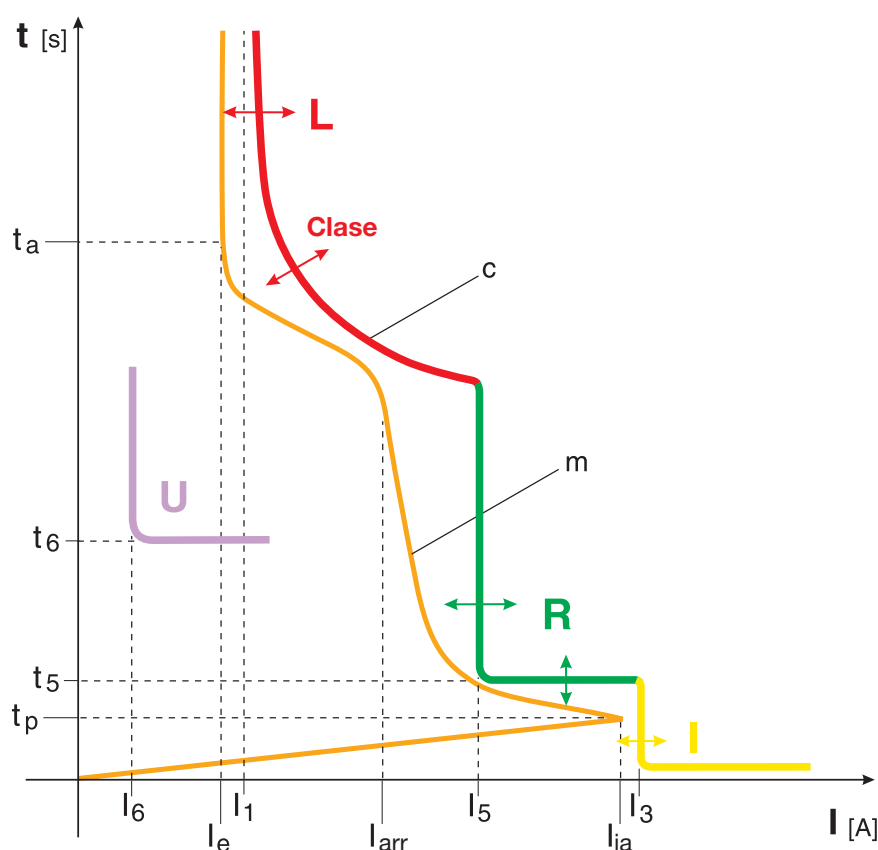
Veamos a continuación cuáles son las protecciones características del relé PR222MP además de las protecciones clásicas contra sobrecargas (L), realizada a través de un modelo térmico que simula las sobretensiones del cobre y del hierro internos del motor, y contra cortocircuitos (I).

Protección contra rotor bloqueado (R): protege el motor de un posible bloqueo del rotor durante el funcionamiento normal. Esta función tiene la capacidad de identificar si la anomalía ocurre en la fase de arranque, en la que la función R resulta inhibida por el tiempo de arranque, o si sucede en la fase de marcha normal, en la que la función R está activa. La función se puede regular en tiempo entre 1 y 10 segundos y en corriente entre 3 y 10 veces I_1 , e interviene cuando al menos una corriente de fase supera los valores ajustados. Es una función que se puede excluir.

Protección contra desequilibrios de fases (U): interviene si una o dos corrientes descienden por debajo del valor ajustado y se mantienen durante un tiempo superior al ajustado. En el ajuste manual presenta un umbral fijo de corriente de 0,4 veces I_1 y de tiempo de 4 s, mientras que en el ajuste electrónico tiene un umbral regulable de corriente entre 0,4 y 0,9 veces I_1 y de tiempo de 1 a 10 segundos. Es una función que se puede excluir.

Protección mediante sensor PTC: contra temperaturas fuera de la tolerancia del motor.

En el siguiente diagrama se puede ver cómo se posiciona en el plano tiempo-corriente la curva de protección que se obtiene con el relé PR222MP respecto de la curva típica que esquematiza la fase de arranque del motor:



I_1 = corriente de intervención función L

I_3 = corriente de intervención función I

I_5 = corriente de intervención función R

t_5 = tiempo de intervención función R

I_6 = corriente de intervención función U

t_6 = tiempo de intervención función U

I_e = intensidad nominal de empleo del motor

I_{arr} = corriente de arranque del motor

I_a = valor de pico de la corriente subtransitoria de arranque

t_a = tiempo de arranque del motor

t_p = duración de la fase subtransitoria de arranque

m = curva típica de arranque del motor

c = ejemplo de curva de intervención de un interruptor con protección del motor con relé de protección electrónico

Las diversas curvas de las funciones, con abundantes regulaciones de los umbrales y los tiempos, permiten diseñar una curva global de intervención realmente cercana a la curva de arranque del motor, optimizando la protección

- soluci3n con interruptor abierto (serie Emax)

todas las funciones descritas y realizadas anteriormente por tres aparatos distintos se solicitan a un 3nico interruptor. Es una soluci3n que se debe utilizar solo en casos particulares en los que, por ejemplo, no se requiera un elevado n3mero de maniobras, t3pico de los motores particularmente grandes (p. ej., a partir de 300 kW), o para responder a exigencias particulares.

- soluci3n con arrancador suave

como elemento de control del motor, el dispositivo basa su funcionamiento en los semiconductores de potencia,

conocidos como tiristores, que permiten controlar, aument3ndola gradualmente, la tensi3n aplicada al motor, haciendo que 3ste arranque lentamente y limitando las corrientes de arranque. Una vez transcurrido el tiempo de subida de la rampa, los tiristores son derivados con un contactor (by-pass) y la l3nea es conectada directamente al motor. Esto significa que los tiristores no permanecen en funcionamiento constantemente, reduciendo as3 posibles problemas derivados de un aumento de temperatura. En la figura 19 se muestran algunos tipos de arrancadores suaves.

Figura 19: Arrancadores suaves



PSR: Gama compacta



PSS: Gama flexible



PST: Gama avanzada

4.1.2 Aplicaciones particulares

- Protección de defectos a tierra

Además de las clásicas funciones de protección termomagnética, a menudo se necesita una protección diferencial del motor que permite detectar a tiempo una dispersión eventual hacia tierra, útil para proteger el motor antes de que el defecto pueda evolucionar generando condiciones peligrosas con recalentamientos excesivos y posibles cortocircuitos. De esta manera se minimizan los daños de la máquina.

Esta protección puede realizarse a través de un diferencial externo que monitoriza las corrientes de la instalación mediante un transformador toroidal; esto permite desvincularse, respecto de un diferencial puro insertado en la línea de alimentación, de la verificación de su protección contra cortocircuitos hecha por el interruptor. Normalmente el diferencial actúa a través de un contacto auxiliar en el contactor, que es el aparato que interrumpe físicamente el circuito con defecto; la acción del diferencial podría también controlar la bobina de apertura del interruptor y solicitarle la interrupción del circuito con defecto.

- Control de velocidad

Por exigencias particulares del proyecto o para aplicaciones introducidas en un contexto de automatización, donde es necesario un sofisticado control del motor, es posible utilizar los accionamientos de velocidad variable (drivers o variadores) que permiten modular la frecuencia de alimentación del motor en función de la carga (por ejemplo, para controlar la capacidad de una bomba sin recurrir a un sistema clásico con válvulas de cierre).

Junto con el control y la gestión de los parámetros eléctricos y mecánicos de la aplicación, la utilización

del variador permite realizar un ahorro energético que se valora entre el 20 y el 50%. ABB ofrece una extensa gama de variadores de frecuencia para aplicaciones industriales.

Estos sistemas están caracterizados por semiconductores y convertidores con tecnología punta capaces de ofrecer sistemas altamente fiables, con una elevada eficiencia y con limitadas exigencias de mantenimiento.

4.1.3 Aparamenta ABB para la coordinación

A continuación se muestra un cuadro esquemático resumido⁽¹⁾ con algunas de las principales características relativas a los dispositivos con los que ABB elabora sus propias tablas de coordinación para los arranques clásicos, respondiendo a las necesidades más comunes y típicas. Para una panorámica más detallada y completa de los distintos dispositivos, remítase a la información contenida en los respectivos catálogos de producto.

Interruptores

Los interruptores para la protección de motores pueden pertenecer a la familia de los interruptores modulares o a los guardamotors (MO... MS...) y a la de los interruptores en caja moldeada (Tmax), cuyas principales características se resumen respectivamente en las tablas 3 y 4.

Pueden encontrarse en versión termomagnética, magnética clásica o con relé electrónico, típicamente en versión tripolar. Para los interruptores en caja moldeada los tamaños de los distintos relés se indican en la tabla 5.

⁽¹⁾ Los productos que se citan a continuación son los que están disponibles en el mercado en el momento de la redacción del presente documento. Con vistas a futuras actualizaciones de los productos se aconseja consultar los catálogos relativos a los productos individuales.

Tabla 3: Tipos de interruptores automáticos modulares de la familia MO – campo de intensidad nominal I_n – capacidad de corte I_{cu} a 400 V CA. Tipos de arrancadores manuales de motor de la familia MS – campo de intensidad nominal I_n – capacidad de corte I_{cu} a 400 V CA – clase de arranque.

Interruptores solo magnéticos MCB		
Tipo	I_n	I_{cu} a 400 V CA
MO325	0,4 - 25	100
MO450	16 - 50	50
MO495	40 - 100	50
MO496	16 - 100	100

Interruptores termomagnéticos MMS			
Tipo	I_n	I_{cu} a 400 V CA	clase
MS116	0,16 - 16	50*	10
MS225	0,16 - 25	50**	10
MS325	0,16 - 25	100***	10
MS450	16 - 50	50	10
MS451	16 - 50	50	20
MS495	40 - 100	50	10
MS496	40 - 100	100	20
MS497	16 - 100	100	10

* $I_n=12$ A $I_{cu}=25$ kA $I_n=16$ A $I_{cu}=16$ kA

** $I_n=9$ A $I_{cu}=40$ kA ; $I_n=12,5$ A y 16 A $I_{cu}=30$ kA ; $I_n=20$ A y 25 A $I_{cu}=10$ kA

*** $I_n=12,5$ A $I_{cu}=75$ kA ; $I_n=16$ A $I_{cu}=60$ kA ; $I_n=20$ A $I_{cu}=55$ kA ; $I_n=25$ A $I_{cu}=50$ kA

Tabla 4: Interruptores en caja moldeada serie Tmax - versiones disponibles con capacidad de corte y combinación con relés para la protección de motores.

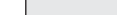
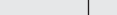
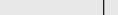
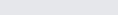
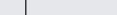
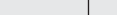
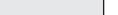
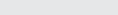
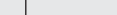
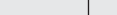
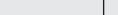
	Interruptores en caja moldeada serie Tmax																							
	T2				T3		T4					T5					T6				T7			
Iu	160				250		250 / 320					400 / 630					630 / 800				800 / 1000 / 1250			
Versión	N	S	H	L	N	S	N	S	H	L	V	N	S	H	L	V	N	S	H	L	S	H	L	V
415 V CA	36	50	70	85	36	50	36	50	70	120	200	36	50	70	120	200	36	50	70	100	50	70	120	150
440 V CA	30	45	55	75	25	40	30	40	65	100	180	30	40	65	100	180	30	45	50	80	50	65	100	130
500 V CA	25	30	36	50	20	30	25	30	50	85	150	25	30	50	85	150	25	35	50	65	40	50	85	100
690 V CA	6	7	8	10	5	8	20	25	40	70	80	20	25	40	70	80	20	22	25	30	30	42	50	60
MF																								
MA																								
PR221DS-I																								
PR231DS-I																								
PR222MP																								
PR221MP																								

Tabla 5: Interruptores en caja moldeada serie Tmax - disponibilidad de tamaños de relés y valores asociados para la protección magnética

T2...160												
Relé de protección magnético fijo MF	In	1	1,6	2	2,5	3,2	4	5	6,5	8,5	11	12,5
	I3=13 x In	13	21	26	33	42	52	65	84	110	145	163
Relé de protección magnético ajustable MA	In	20	32	52	80	100						
	I3=(6..12) x In	120...240	192...384	314...624	480...960	600...1200						
Relé de protección electrónico PR221MP*	In	63	100	160								

* I1=(0,65...1) x In I3= (2,5..17,5) x In

T3...250					
Relé de protección magnético ajustable MA	In	100	125	160	200
	I3=(6..12) x In	600...1200	750...1500	960...1920	1200...2400

T4...250									
Relé de protección magnético ajustable MA	In	10	25	52	80	100	125	160	200
	I3=(6..14) x In	60...140	150...350	314...728	480...1120	600...1400	750...1750	960...2240	1200...2800

Relé de protección electrónico PR221DS-I*	In				
T2...160	10	25	63	100	160
T4...250	100	160	250		
T4...320	320				
T5...400	320	400			
T5...630	630				
T6...630	630				
T6...800	800				

* I3= (1..10) x In

Relé de protección electrónico PR231DS-I*	In
T7...800	800
T7...1000	1000
T7...1250	1250

* I3= (1..12) x In

Relé de protección electrónico PR222MP*	In		
T4...250	100	160	200
T5...400	320	400	
T6...800	630		

* I1=(0,4...1)x In I3= (6..13) x In; disponibilidad de funciones específicas R U

Contactores

ABB ofrece distintos tipos de contactores, pero los más utilizados para la maniobra y mando de motores asíncronos trifásicos son los contactores tripolares que pertenecen a la serie que se identifica con las letras "A" o "AF" y que se caracterizan por tipos que van desde A9 hasta AF 2050 con las características eléctricas principales que se muestran en la tabla 6.

Son aparatos tripolares con circuito de control en corriente alterna y núcleo magnético laminado, para los contactores de tipo "A", o con circuito de control en corriente alterna o continua con bobina electrónica de amplio rango de tensión de funcionamiento, para los contactores de tipo "AF".

Ofrecen amplias posibilidades de incorporación de accesorios con contactos auxiliares con montaje frontal o lateral.

Existe también la gama de contactores con circuito de control en corriente continua (AL) que tiene las mismas características eléctricas de la gama A.

Relés de protección de sobrecarga

ABB ofrece varios tipos de relés para las sobrecargas que van desde los clásicos bimetálicos (térmicos) identificados con la sigla "TA..DU.." o "TA..SU.." hasta los electrónicos identificados con la sigla "E..DU..", cuyas principales características se resumen en la tabla 7.

Estos relés, disponibles en versión tripolar, son sensibles a la falta de fase, están compensados térmicamente, admiten el rearme automático y pueden equiparse con contactos auxiliares.

También hay disponibles unidades más sofisticadas, como las INSUM o UMC, que ofrecen protecciones mucho más completas comparadas con las de un relé térmico convencional, con mayor eficiencia global para las mayores magnitudes monitorizadas, amplios campos de regulación, posibilidad de seleccionar la protección para las diversas condiciones de arranque, baja absorción, alta precisión de disparo y posibilidad de integración en una lógica de gestión y control.

Tabla 6: Contactores de la familia A y AF - principales características eléctricas

	A9	A12	A16	A26	A30	A40	A45	A50	A63	A75	A95	A110	A145	A185	A210	A260	A300	AF400	AF460	AF580	AF750	AF1350	AF1650	
Vmax empleo	690 V CA						1000 V CA								690 V CA									
Ie 415 V CA*	9	12	17	26	32	37	37	50	65	75	96	110	145	185	210	260	300	400	460	580	750	860	1050	
Ie 690 V CA*	7	9	10	17	21	25	25	35	43	46	65	82	120	170	210	220	280	350	400	500	650	800	950	
Icw 1 s**	250	280	300	400	600	600	1000	1000	1000	1000	1320	1320	1800	2000	2500	3500	3500	4600	4600	7000	7000	10000	12000	
Icw 10 s**	100	120	140	210	400	400	650	650	650	650	800	800	1200	1500	1700	2400	2400	4400	4400	6400	6400	8000	10000	
Icw 30 s**	60	70	80	110	225	225	370	370	370	370	500	500	800	1000	1200	1500	1500	3100	3100	4500	4500	6000	7500	
Icw 60 s**	50	55	60	90	150	150	250	250	250	250	350	350	600	800	1000	1100	1100	2500	2500	3500	3500	4500	5500	
Pdl 440 V CA***	250	250	250	420	820	820	820	1300	1300	1300	1160	1160	1500	2000	2300	2600	3000	4000	5000	6000	7500	10000	12000	
Pdl 690 V CA***	90	90	90	170	340	340	490	630	630	630	800	800	1200	1600	2000	2400	2500	3500	4500	5000	7000	-	-	

*) en la categoría AC-3 con Tamb < 55 °C

**) con Tamb de 40 °C desde estado en frío del aparato

***) cosφ=0,45, cosφ=0,35 para Ie > 100 A

Tabla 7: Relés de sobrecarga bimetálicos y electrónicos - Umbral de regulación y capacidad de combinación con contactores

	TA25DU..*	TA42DU..	TA75DU..	TA80DU..	TA110DU..	TA200DU..	TA450DU..	TA450SU..
Clase	10A							30
	20				-	-	-	-
Umbral de regulación mínimo [A]	0,1-0,16	18-25	18-25	29-42	65-90	66-90	130-185	40-60
Umbral de regulación máximo [A]	24-32	29-42	60-80	60-80	80-110	150-200	220-315	220-310
Posibilidad de combinación	A9...A40	A30,A40	A50...A75	A95,A110		A145,A185	A210,A300	

*) In clase 20 a partir de TA25DU1.8 con regulación desde 1,3 A hasta 1,8 A

	E16DU	E45DU **	E80DU **	E140DU **	E200DU	E320DU	E500DU	E800DU	E1250DU
Clase	10-20-30 *	10 o 10-20-30			10-20-30***				
Umbral de regulación mínimo [A]	0,1-0,32	9-30	27-80	50-140	60-200	100-320	150-500	250-800	375-1250
Umbral de regulación máximo [A]	5,7-18,9	15-45							
Posibilidad de combinación	A9...A16	A26...A40	A50...A75	A95,A110	A145,A185	A210...A300	AF400,AF460	AF580,AF750	AF1350,AF1650

*) cada clase tiene su propio código de pedido

**) clase fija (10) o ajustable (10-20-30) con códigos distintos

***) ajustable en el propio dispositivo

Seccionadores con fusibles

Los seccionadores con fusibles con función de maniobra y protección, tal y como se muestra en la tabla 8, son la serie OS, que abarca desde los 32 A hasta los 1250 A. Se combinan con un fusible de protección contra cortocircuitos. Satisfacen las principales exigencias en términos de seguridad, facilidad de instalación y conveniencia de funcionamiento.

Arrancadores suaves

ABB ofrece tres tipos distintos de arrancadores suaves para responder a las exigencias de cada cliente para aplicaciones que van desde los 3 A hasta los 1050 A a 400 V CA con conexión en línea. En el siguiente cuadro resumido, la tabla 9, se ilustran las características principales de los distintos modelos:

- PSR3...105: gama de arrancadores suaves para motores con intensidades nominales que van desde los 3 A hasta los 105 A a 400 V CA con conexión en línea. Resultan extremadamente compactos y fáciles de instalar, ya sea montados sobre una guía DIN o atornillados al panel del cuadro. Esta gama ofrece la posibilidad de coordinación con guardamotor MS y dispone de un sistema de comunicación flexible, mediante el sistema Field Bus Plug diseñado por ABB.
- PSS18...300: gama de arrancadores suaves para motores con intensidades nominales desde 18 A hasta 300 A a

400 V CA con conexión en línea, que ofrece una solución adaptable a cada aplicación gracias a su flexibilidad y fiabilidad incluso en las condiciones más exigentes de utilización. Esta gama de arrancadores ofrece la posibilidad de aprovechar la misma unidad para una conexión en línea o para una conexión en triángulo, es decir, en un arranque en Y/Δ el mismo aparato puede conectarse en el interior del circuito de triángulo de modo que la corriente que le afecta se ve reducida en aproximadamente el 42%. Esta posibilidad se puede verificar en la sigla identificativa del tipo de aparato donde, por ejemplo, la sigla PSS60/105 indica que la corriente máxima del motor controlable con una conexión en línea es de 60 A, mientras para una conexión en triángulo el motor controlado puede tener una corriente máxima de 105 A.

- PST30...300 y PSTB370...1050: gama de arrancadores suaves para motores con intensidades nominales desde 30 A hasta 1050 A a 400 V CA con conexión en línea, que ofrece numerosas funcionalidades avanzadas integradas (p. ej., protección contra rotor bloqueado, desbalance de fase, inversión de fase). La misma unidad ofrece la posibilidad de conexión en línea o en triángulo (en esta configuración la corriente máxima posible para el motor es de 1810 A), incluye un sistema de comunicación muy flexible y una interfaz sencilla a través de una simple pantalla LCD.

Tabla 8: Seccionadores con fusibles - parámetros de selección

	OS32	OS50	OS63	OS100	OS125	OS160	OS200	OS250	OS315	OS400	OS630	OS800	OS1250
Corriente* [A]	32	50	63**	100**	125**	160**	200	250	315	400	630	800	1000
Potencia** [W]	415 V CA	15	22	30	55	75	110	145	180	230	355	450	560
	690 V CA	22	37	55	90	110	132	200	250	315	400	630	710
													1000

* Intensidad nominal operativa en AC-23 A hasta 690 V CA

** Para la categoría de utilización B servicio infrecuente

*** Potencia nominal operativa: potencia de motores asíncronos combinables

Tabla 9: Arrancadores suaves - características generales

	PSR 3	PSR 6	PSR 9	PSR 12	PSR 16	PSR 25	PSR 30	PSR 37	PSR 45	PSR60	PSR72	PSR85	PSR105
Intensidad nominal*	3,9	6,8	9	12	16	25	30	37	45	60	72	85	105
Contactor de línea	A9	A9	A9	A12	A16	A26	A30	A40	A50	A63	A75	A95	A110
Contactor de bypass	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado	Integrado
Protección térmica	TA25DU						TA42DU		TA75DU	TA75DU	TA75DU	TA110DU	TA110DU

* SS conectados en línea. V=400 V

	PSS18/30	PSS30/52	PSS37/64	PSS44/76	PSS50/85	PSS60/105	PSS72/124	PSS85/147	PSS105/181	PSS142/245	PSS175/300	PSS250/430	PSS300/515
Intensidad nominal*	18	30	37	44	50	60	72	85	105	142	175	250	300
Intensidad nominal**	30	52	64	76	85	105	124	147	181	245	300	430	515
Contactor de línea	A26	A30	A40	A50	A50	A63	A75	A95	A110	A145	A185	A260	A300
Contactor de bypass	A9	A16	A26	A26	A30	A40	A50	A50	A63	A75	A110	A145	A210
Protección térmica	TA25DU		TA42DU		TA75DU			TA110DU		TA200DU		TA450DU	

* SS conectados en línea. V=400 V

** SS conectados en triángulo. V=400 V

	PST30	PST37	PST44	PST50	PST60	PST72	PST85	PST105	PST142	PST175	PST210	PST250	PST300
Intensidad nominal*	30	37	44	50	60	72	85	105	142	175	210	250	300
Intensidad nominal**	52	64	76	85	105	124	147	181	245	300	360	430	515
Contactor de línea	A30	A40	A50	A50	A63	A75	A95	A110	A145	A185	A210	A260	A300
Contactor de bypass	A16	A26	A26	A30	A40	A50	A50	A63	A95	A110	A145	A145	A210
Protección térmica	Protección de sobrecarga con simulación de la temperatura del motor a partir de la corriente medida, clase de disparo seleccionable 10-10A-20-30												

* Conexión en línea. 400 V

** SS conectados en triángulo. V=400 V

	PSTB370	PSTB470	PSTB570	PSTB720	PSTB840	PSTB1050
Intensidad nominal*	370	470	570	720	840	1050
Intensidad nominal**	640	814	987	1247	1455	1810
Contactor de línea	AF400	AF460	AF580	AF750	-	-
Contactor de bypass	integrado	integrado	integrado	integrado	integrado	integrado
Protección térmica	Protección de sobrecarga con simulación de la temperatura del motor a partir de la corriente medida, clase de disparo seleccionable 10-10A-20-30					

* Conexión en línea a 400 V

** SS conectados en triángulo. V=400 V

Variadores de frecuencia

A continuación informamos de forma breve y sintética sobre algunos de los variadores de frecuencia disponibles y sugerimos consultar la documentación específica de cada producto para conocer más en detalle su disponibilidad y sus características técnicas.

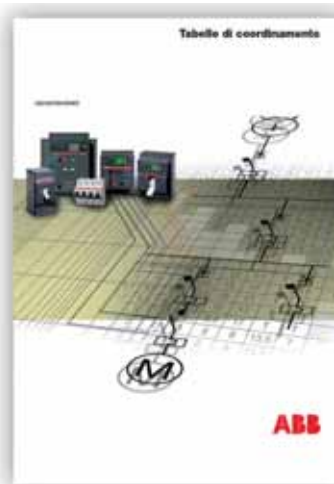
Los variadores de frecuencia de la familia "machinery drives" (variadores de maquinaria), desde el ACS50 hasta el ACS350 (pasando por los ACS55 – ACS100 – ACS140 – ACS150), o de la familia "standard drives" (variadores estándar), con los ACS550 o los ACH550, destinados a aplicaciones para unidades de tratamiento del aire (HVAC), representan la elección ideal para situaciones que requieren un accionamiento de fácil instalación, puesta en servicio y utilización, idónea para un control preciso de velocidad y par de los motores de jaula de ardilla con potencias variables de entre 0,55 y 355 kW. Estos variadores, basados en la tecnología PWM, pueden utilizarse en una extensa gama de sectores industriales, tanto para las aplicaciones más sencillas con par cuadrático como bombas y ventiladores, así como para obtener dinámicas más exigentes.

Los variadores de frecuencia de la familia "industrial drives" (variadores industriales) con los ACS800, basados en la tecnología DTC (Direct Torque Control, control directo del par) ofrecen una respuesta rápida a las variaciones de la carga del motor para asegurar un funcionamiento constante. Los ACS800, dotados de filtros EMC y de inductancias ya integradas en el interior del accionamiento, ofrecen un mejor rendimiento y aseguran una mayor facilidad de puesta en servicio y programación, con lo que el accionamiento resulta apto para una amplia gama de aplicaciones. La gama de variadores ACS800 permite el control de motores con un rango de potencias muy extenso, desde 0,55 hasta 5600 kW, y con tensiones de alimentación de entre 380 y 690 V.

4.2 Interpretación de las tablas ABB para la coordinación de motores

Para las diversas posibles soluciones propuestas y para los diversos tipos de arranque (arranques directo o en Y/ Δ - normales o pesados - tipo 2 o tipo 1) ABB pone a su disposición algunas tablas de coordinación que surgen de pruebas experimentales y, en otros casos, de la extensión de los resultados obtenidos. Este soporte guía a los clientes en la elección de dispositivos que garanticen la coordinación, la protección y la idoneidad para la maniobra y protección del motor. Las tablas hacen referencia a las tensiones y corrientes de cortocircuito más comunes en las instalaciones (415 V CA, 440 V CA, 500 V CA, 690 V CA, 35 kA, 50 kA y 65 kA, entre otras). Recordamos que se puede encontrar un compendio de las tablas más utilizadas y que responden a las

necesidades típicas del cliente para el arranque de motores en el documento "Tablas de coordinación", cód. 1SDC007004D0906 de marzo de 2008 (véase la imagen de la portada) en el que también se pueden encontrar referencias a coordinaciones de respaldo (Back-up) y selectividad a 415 V CA en interruptores ABB.



Puede encontrarse un compendio más completo de las distintas soluciones existentes para la coordinación de motores en el sitio <http://www.abb.com/lowvoltage>, siguiendo la ruta: "Support - Online Product Selection Tools - Coordination Tables for motor protection" hasta llegar a la siguiente página inicial:



para después poder acceder mediante la opción "selection" al módulo de búsqueda de la coordinación de su interés:



A continuación detallamos la estructura de las tablas proporcionando un ejemplo de lectura, ilustrando el significado de los distintos campos (identificados con números del 1 al 6) y de las informaciones útiles que se pueden deducir y que caracterizan a la solución

propuesta, pero que son comunes también a todas las demás tablas. La referencia del ejemplo de lectura son las tablas 10 y 11 que se muestran a continuación tal y como pueden encontrarse en el compendio "Tablas de coordinación" antes citado.

Tabla 10: Tabla de coordinación de motores DOL - guía para su lectura

DOL a 400/415 V - 50 kA -Tipo 2 - Arranque normal

1

Motor		MCCB		Contactor	Relé sobrecarga		Grupo
Potencia nominal Pe [kW]	Intensidad nominal Ie [A]	Tipo	Ajuste protección magnética [A]	Tipo	Tipo	Campo de regulación mín. [A] máx. [A]	I max [A]
0,37	1,1	T2S160 MF 1.6	21	A9	TA25DU1.4	1 1,4	1,4
0,55	1,5	T2S160 MF 1.6	21	A9	TA25DU1.8	1,3 1,8	1,6
0,75	1,9	T2S160 MF 2	26	A9	TA25DU2.4	1,7 2,4	2
1,1	2,8	T2S160 MF 3.2	42	A9	TA25DU4	2,8 4	3,2
1,5	3,5	T2S160 MF 4	52	A16	TA25DU5	3,5 5	4
2,2	5	T2S160 MF 5	65	A26	TA25DU6.5	4,5 6,5	5
3	6,6	T2S160 MF 8.5	110	A26	TA25DU8.5	6 8,5	8,5
4	8,6	T2S160 MF 11	145	A30	TA25DU11	7,5 11	11
5,5	11,5	T2S160 MF 12.5	163	A30	TA25DU14	10 14	12,5
7,5	15,2	T2S160 MA 20	210	A30	TA25DU19	13 19	19
11	22	T2S160 MA 32	288	A30	TA42DU25	18 25	25
15	28,5	T2S160 MA 52	392	A50	TA75DU42	29 42	42
18,5	36	T2S160 MA 52	469	A50	TA75DU52	36 52	50
22	42	T2S160 MA 52	547	A50	TA75DU52	36 52	50
30	56	T2S160 MA 80	840	A63	TA75DU80	60 80	65
37	68	T2S160 MA 80	960	A75	TA75DU80	60 80	75
45	83	T2S160 MA 100	1200	A95	TA110DU110	80 110	96
55	98	T3S250 MA 160	1440	A110	TA110DU110	80 110	110
75	135	T3S250 MA 200	1800	A145	TA200DU175	130 175	145
90	158	T3S250 MA 200	2400	A185	TA200DU200	150 200	185
110	193	T4S320 PR221-I In320	2720	A210	E320DU320	100 320	210
132	232	T5S400 PR221-I In400	3200	A260	E320DU320	100 320	260
160	282	T5S400 PR221-I In400	4000	A300	E320DU320	100 320	300
200	349	T5S630 PR221-I In630	5040	AF400	E500DU500	150 500	400
250	430	T6S630 PR221-I In630	6300	AF460	E500DU500	150 500	430
290	520	T6S800 PR221-I In800	7200	AF580	E800DU800	250 800	580
315	545	T6S800 PR221-I In800	8000	AF580	E800DU800	250 800	580
355	610	T6S800 PR221-I In800	8000	AF750	E800DU800	250 800	750

2

3

3a

4

5

5a

5b

6

- define el campo de validez de la tabla en términos de datos de instalación y tipos de arranque, las informaciones contenidas son:
 - tipo de arranque: directo DOL
 - características eléctricas de la instalación en la que la coordinación tiene validez (tensión 400 V/415 V, corriente de cortocircuito 50 kA)
 - características de la coordinación: (tipo 2 - arranque normal)
- define las características del motor en términos de potencia y intensidad nominal con referencia a los datos estándar de los motores ABB.
- identifica el tipo de dispositivo de protección contra cortocircuitos y contiene información relativa a:
 - familia y calibre (T2..160 o T5..400)
 - versión referida a los datos eléctricos de instalación (versión "S" que a 400 V / 415 V tiene una capacidad de corte idónea para los 50 kA de la instalación)
 - tipo y intensidad nominal del dispositivo de protección contra cortocircuitos (...MF11 - ...MA100 - ...PR221-I In400). En el campo **3a** también se aconseja el valor de ajuste para el umbral de intervención magnética.
- define el tipo de contactor indicando su nombre (A95 – AF750)
- identifica el tipo de dispositivo de protección contra sobrecargas y contiene información relativa a:
 - tipo (bimetálico TA25... - TA200... o electrónico E320...)
 - correspondencia con las características para el arranque normal (...DU para el relé bimetálico o con clase de disparo ajustable para los electrónicos)
 - corriente máxima de no disparo (...2.4 - ...175 - ...320). Reconstruyendo las diversas partes se obtiene el nombre completo del dispositivo de protección térmica (TA25DU2.4 – TA200DU175 – E320DU320). En los campos **5a** y **5b** se indican los valores mínimo y máximo para los ajustes posibles.
- define la corriente de referencia para la elección del cable que debe utilizarse para la coordinación según la norma IEC 60947-4-1.

Tabla 11: Tabla de coordinación de motores Y/ Δ - guía para su lectura

Estrella-triángulo - Tipo 2 a 400/415 V - 35 kA - 50/60 Hz

1

Motor		MCCB		Contactor			Relé sobrecarga	
Pe [kW]	Ie [A]	tipo	Im [A]	línea tipo	triángulo tipo	estrella tipo	tipo	[A]
18,5	36	T2N160 MA52	469	A50	A50	A26	TA75DU25	18-25
22	42	T2N160 MA52	547	A50	A50	A26	TA75DU32	22-32
30	56	T2N160 MA80	720	A63	A63	A30	TA75DU42	29-42
37	68	T2N160 MA80	840	A75	A75	A30	TA75DU52	36-52
45	83	T2N160 MA100	1050	A75	A75	A30	TA75DU63	45-63
55	98	T2N160 MA100	1200	A75	A75	A40	TA75DU63	45-63
75	135	T3N250 MA160	1700	A95	A95	A75	TA110DU90	66-90
90	158	T3N250 MA200	2000	A110	A110	A95	TA110DU110	80-110
110	193	T3N250 MA200	2400	A145	A145	A95	TA200DU135	100-135
132	232	T4N320 PR221-I In320	2880	A145	A145	A110	E200DU200	60-200
160	282	T5N400 PR221-I In400	3600	A185	A185	A145	E200DU200	60-200
200	349	T5N630 PR221-I In630	4410	A210	A210	A185	E320DU320	100-320
250	430	T5N630 PR221-I In630	5670	A260	A260	A210	E320DU320	100-320
290	520	T6N630 PR221-I In630	6300	AF400	AF400	A260	E500DU500	150-500
315	545	T6N800 PR221-I In800	7200	AF400	AF400	A260	E500DU500	150-500
355	610	T6N800 PR221-I In800	8000	AF400	AF400	A260	E500DU500	150-500

2

3

3a

4

5

5a

- 1 define el campo de validez de la tabla en términos de datos de instalación y tipos de arranque, las informaciones contenidas son:
- tipo de arranque: en estrella/triángulo Y/ Δ
 - características eléctricas de la instalación en la que la coordinación tiene validez (tensión 400 V / 415 V, corriente de cortocircuito 35 kA)
 - características de la coordinación: (tipo 2)

Los campos 2 3 3a proporcionan la misma información descrita anteriormente en la tabla 10

- 4 proporciona indicaciones relativas a los contactores; se aprecia cómo los contactores de línea y de triángulo son iguales entre sí, se recuerda que para este arranque en particular estos contactores no operan a plena intensidad nominal del motor (sino reducida en 1,73 veces), incluso si a menudo la magnitud del aparato está condicionada por la coordinación con el dispositivo de protección contra cortocircuitos. El tercer contactor es el de estrella, que ve cómo la corriente del motor se reduce 0,33 veces, pero para la conexión en estrella no se requiere la protección contra cortocircuitos, por lo que el tamaño de este contactor puede reducirse.
- 5 identifica el tipo del dispositivo de protección contra sobrecargas, la información relativa al tipo de relé es la misma proporcionada anteriormente, con una única puntualización sobre el campo 5a de regulación de la intensidad nominal que debe adecuarse a la corriente del motor reducida 1,73 veces en concordancia con la corriente vista por el relé de sobrecarga.

5 Identificación de un motor asíncrono: principales parámetros del motor

Un motor se caracteriza por diversos parámetros eléctricos y de tipo constructivo que identifican el correcto campo de aplicabilidad. El conjunto de todos estos parámetros constituye los datos de identificación de la máquina que figuran en una placa colocada en el motor.

A continuación se proporciona una breve descripción de los principales parámetros contenidos en los datos de la placa, de un modo más genérico para los parámetros de naturaleza eléctrica que son los más notables y los de más fácil interpretación y prestando más atención sobre los que quizás sean menos conocidos y relativos a las condiciones de trabajo o ambientales.

Los parámetros eléctricos y mecánicos que constituyen los datos de la placa de un motor identifican las prestaciones nominales y son:

- la potencia en kW que representa la potencia mecánica nominal disponible en el eje. En muchos países es habitual expresar la potencia mecánica disponible en el eje del motor también en caballos de vapor (1 CV en el sistema anglosajón equivale a 745,7 W; 1 CV en el sistema métrico, a 736 W).
- la tensión de alimentación del motor, por ejemplo 230 VΔ, 400 VY.

Teniendo a disposición un sistema de distribución trifásico a 400 V (tensión fase-neutro 230 V, fase-fase 400 V), el motor sólo puede conectarse en estrella. En la conexión en triángulo, los devanados del motor recibirían 400 V, cuando han sido diseñados para una tensión de 230 V; por lo tanto, el motor considerado no resulta idóneo para la conexión a la red del ejemplo con los devanados conectados en triángulo.

En resumen, un motor que disponga de doble tensión de empleo podría ser utilizado en las siguientes configuraciones:

- devanados con conexión sólo en triángulo alimentados con la tensión inferior;
- devanados con conexión sólo en estrella alimentados con la tensión superior;
- devanados con conexión en Y/Δ (con seis conductores al motor) con configuraciones en Y en el arranque y en Δ en marcha normal, posible cuando el valor inferior de la tensión nominal del motor coincide con la tensión de la red de alimentación;
- la intensidad nominal asociada a la potencia y a la tensión a través de los parámetros de rendimiento " η " y factor de potencia nominal " $\cos\varphi$ ";
- la velocidad de rotación en rpm relativa a la frecuencia (50 Hz o 60 Hz) y al número de polos.

La otra información proporcionada en los datos de la placa, y como se ha dicho anteriormente con un significado menos explícito o más difícilmente reconocible, es la referente a:

- tipo de servicio: debe ser especificado por el usuario del motor (clasificaciones proporcionadas por la norma IEC 60034-1 "*Máquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Características nominales y características de funcionamiento*") y sirven para determinar las características nominales que la máquina debe tener en función del tipo de servicio. Si no se especifica el tipo de servicio,

el motor se considerará idóneo para el tipo de servicio S1 (servicio continuo). Para una profundización sobre los tipos de servicio, véase el apéndice D;

- grado de protección clasificación IP: indica el grado de protección proporcionado por el diseño integral de las máquinas eléctricas rotativas (prescripciones y clasificación según la norma IEC 60034-5 "*Grados de protección proporcionados por el diseño integral de las máquinas rotativas*"). La primera cifra característica indica el grado de protección proporcionado por la envolvente tanto para las personas como para las partes de la máquina alojadas en el interior de la envolvente. Proporciona información sobre la protección contra el acercamiento o el contacto con partes bajo tensión, contra el contacto con partes en movimiento dentro de la envolvente y la protección de la máquina contra la introducción de cuerpos sólidos extraños.

La segunda cifra característica indica el grado de protección proporcionado por la envolvente contra la entrada de agua.

- clase térmica: indica un límite de temperatura admitido por los devanados del motor. Se expresa a través de clases de aislamiento identificadas con letras, a las que se asocia la temperatura máxima admitida por los devanados, como se muestra en la tabla 12. A menudo se utilizan sistemas con clase de aislamiento F para los que se admite una sobretensión de la clase B (tiene en cuenta un margen de seguridad de la vida del aislamiento).

Tabla 12: Referencias para la clase térmica y la temperatura relativa

Clase térmica	Clase de temperatura
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180

Otros códigos que permiten detallar aún más los tipos de motor, pero que resultan bastante complejos de interpretar y relativos a problemas no estrictamente ligados al objetivo de esta publicación, pueden ser:

- código IC: es una designación relativa al método de enfriamiento y está compuesta por cifras y letras que representan la disposición del circuito, el líquido de refrigeración y el método de circulación de dicho líquido. Para más detalles, véase la norma IEC 60034-6 "*Máquinas eléctricas rotativas. Parte 6: Métodos de refrigeración*".
- código IM: es una indicación relativa a la clasificación de los tipos de construcción (característica de los componentes de la máquina en cuanto a los dispositivos de fijación, el tipo de los soportes y la extremidad del eje) y de las disposiciones de montaje de las máquinas eléctricas rotativas (posicionamiento de la máquina en el lugar de trabajo en relación con la línea de eje y con los dispositivos de fijación). Para más detalles, véase la norma IEC 60034-7 "*Máquinas eléctricas rotativas. Parte 7: Clasificación de los tipos de construcción y de las disposiciones de montaje*".

Apéndice A: Teoría del motor asíncrono trifásico

A continuación, sin entrar en detalladas explicaciones teóricas, aportaremos algunos conceptos sobre el principio de funcionamiento del motor asíncrono.

El motor asíncrono es un tipo de motor eléctrico de corriente alterna en el que la frecuencia de rotación no es igual sino inferior a la frecuencia de red, es decir, no es "síncrono" con ella, de ahí el origen de su nombre.

Por efecto de la alimentación del circuito del estátor, se produce un campo magnético rotante que tiene una velocidad (velocidad de sincronismo n_0) ligada a la frecuencia de la red de alimentación. El rotor, cerrado en cortocircuito y sometido al campo magnético del estátor, es objeto de una fuerza electromotriz inducida que genera corrientes cuyo efecto es el de crear un par motor que hace girar el rotor a fin de oponerse a la causa que ha generado el fenómeno (ley de Lenz). De este modo, el rotor acelera tendiendo idealmente a la velocidad de sincronismo, a la que correspondería un par motor nulo, generando así una situación de inestabilidad para el motor. Sin embargo, en la práctica el motor alcanza una velocidad inferior (concepto de deslizamiento, como diferencia de velocidad entre el campo magnético estático y la velocidad del rotor) tal que en vacío (sin carga externa conectada al eje del motor) el par motor iguala los pares de fricción y ventilación, mientras que con carga el par motor iguala la suma de los pares precedentes y del par de resistencia aplicado al eje.

Tal y como ya se ha mencionado, la velocidad a la que el motor no produce par se llama velocidad de sincronismo.

Esta velocidad está ligada a la frecuencia de alimentación y al número de pares de polos de la relación:

$$n_0 = \frac{60 \times f}{p} \text{ donde}$$

n_0 es la velocidad de sincronismo en vueltas por minuto

f es la frecuencia de la red de alimentación

p es el número de pares de polos

(los pares de polos se determinan dividiendo entre dos el número de polos que presenta el motor).

Con la fórmula precedente, en el caso de, por ejemplo, un motor con 8 polos (4 pares de polos) alimentado a 50 Hz, es posible obtener la velocidad de sincronismo " n_0 " que viene a ser:

$$n_0 = \frac{60 \times 50}{4} = 750 \text{ rpm}$$

En la tabla A1 a modo ilustrativo proporcionamos el valor de la velocidad de sincronismo calculada, para motores con diverso número de polos, a las dos frecuencias típicas de instalación (50 y 60 Hz).

Tabla A1: Velocidad de sincronismo del motor asíncrono trifásico en función del número de polos y de la frecuencia

Nº de polos	Velocidad de sincronismo n_0 50 Hz	Velocidad de sincronismo n_0 60 Hz
4	1500	1800
6	1000	1200
8	750	900
10	600	720

En el funcionamiento normal el rotor (y por lo tanto el eje del motor en giro solidario) presenta una velocidad inferior. Incluso en el funcionamiento en vacío, es decir sin carga aplicada, no se alcanza la velocidad de sincronismo por las pérdidas intrínsecas del motor ligadas, por ejemplo a la fricción con los cojinetes que soportan el eje y que ofrecen un pequeño par de resistencia.

De la diversidad entre la velocidad de rotación del rotor " n " y del campo magnético del estátor " n_0 " se puede definir una velocidad relativa " s ", expresada con la fórmula $s = \frac{n_0 - n}{n_0}$ y definida con propiedad como velocidad de deslizamiento. De ahí que el deslizamiento " s " se defina como:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

y pueda asumir todos los valores comprendidos entre los valores límite 0 y 1 a partir de las condiciones de funcionamiento; concretamente:

$n = 0$ rotor parado, por lo que $s = 1$ (rotor bloqueado)

$n = n_0$ rotor con velocidad de sincronismo, por lo que $s = 0$ (sólo teórica)

A modo orientativo se puede asumir que el deslizamiento que caracteriza a los motores asíncronos en su funcionamiento a plena carga posee valores comprendidos entre el 3 y el 7%, donde los valores inferiores son típicos de los motores de potencia elevada.

Siguiendo con el ejemplo del motor anterior, caracterizado por una velocidad de sincronismo de 750 rpm, suponiendo un deslizamiento del 4%, la velocidad real en condiciones normales sería:

$$n = n_0 - (s \times n_0) = 750 - (0,04 \times 750) = 720 \text{ rpm}$$

En la tabla A2 proporcionamos un ejemplo, para algunas potencias, de los valores típicos que pueden asumir, a 415 Vca, el rendimiento, el factor de potencia y la intensidad nominal, para los tipos más comunes de motores asíncronos trifásicos con distinto número de polos.

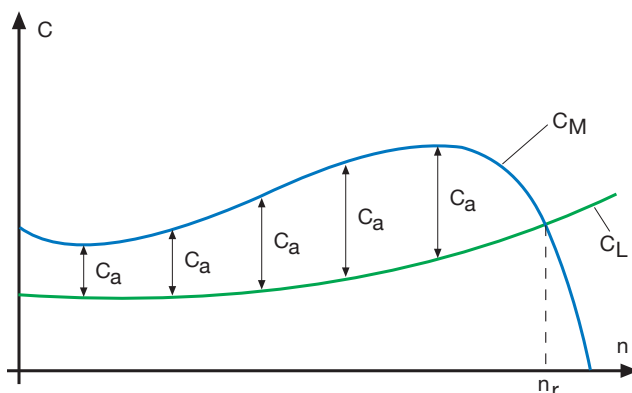
Tabla A2: Valores típicos de rendimiento, factor de potencia y intensidad nominal (referida a la tensión de alimentación V_L de 415 V CA)

Potencia nominal [kW]	Rendimiento η a plena carga %			Factor de potencia a plena carga $\cos\varphi$			Intensidad nominal [A] $I_e = \frac{P_e \times 1000}{\sqrt{3} \times V_L \times \cos\varphi \times \eta}$		
Pe	2P	4P	6P	2P	4P	6P	2P	4P	6P
75	94.8	95.0	94.9	0.87	0.82	0.80	127	134	137
90	95.1	95.2	95.3	0.89	0.83	0.83	148	158	158
110	95.1	95.3	95.3	0.85	0.83	0.83	189	193	193
132	95.7	95.5	95.4	0.87	0.84	0.84	221	229	229
160	96.1	96.0	95.5	0.89	0.85	0.83	260	273	281
200	96.3	96.2	95.8	0.90	0.85	0.83	321	340	350
250	96	96.2	96.0	0.88	0.85	0.80	412	425	453
315	96.4	96.4	96.0	0.89	0.85	0.82	511	535	557
355	96.5	96.6	96.5	0.87	0.85	0.84	588	601	609
400	96.8	96.6	96.5	0.88	0.86	0.84	653	670	687

Apéndice B: Una primera aproximación a la valoración del tiempo de arranque

Los problemas relacionados con la operación de arranque de un motor están fundamentalmente asociados al tipo de motor, que ofrece un determinado par motor " C_M ", a la modalidad de arranque y al tipo de carga conectada, que presenta un determinado par de resistencia " C_L ". El par de arranque " C_a " necesario podrá expresarse como $C_a = C_M - C_L$ y deberá estar bien calibrado para evitar que sea insuficiente, de forma que haga que el arranque sea largo y pesado con peligro de sobrecalentamiento del motor, o excesivo para evitar esfuerzos mecánicos demasiado elevados sobre las juntas o en las máquinas operativas. En la figura B1 se presenta un comportamiento genérico de las magnitudes en cuestión.

Figura B1: Comportamiento típico de los pares



A este concepto de arranque bien calibrado se puede asociar el concepto de tiempo de arranque " t_a ", que puede evaluarse haciendo referencia a conceptos ligados a la dinámica del movimiento, pero también introduciendo hipótesis simplificativas que permiten una valoración con una aproximación óptima.

Es posible asociar el par de aceleración, expresado como la diferencia entre el par motor y el par de resistencia, al momento de inercia del motor " J_M ", de la carga " J_L " y a la aceleración angular, obteniendo la siguiente expresión:

$$(C_M - C_L) = (J_M + J_L) \times \frac{d\omega}{dt}$$

donde la expresión de " $d\omega$ " adopta la siguiente forma $d\omega = \frac{2 \times \pi \times dn}{60}$ y se obtiene diferenciando la expresión de la velocidad angular citada $\omega = \frac{2 \times \pi \times n}{60}$.

Con simples operaciones matemáticas y a través del método de cálculo integral se puede despejar la magnitud de la incógnita " t_a " con la siguiente expresión:

$$t_a = \int_0^{n_0} \frac{2 \times \pi \times (J_M + J_L)}{60} \times \frac{dn}{(C_M - C_L)}$$

Para expresar el valor del par de aceleración, es necesario introducir algunas simplificaciones:

- la primera consiste en considerar un valor medio para el par motor expresado como $C_M = 0,45 \times (C_{ia} + C_{max})$ donde C_{ia} representa el par inicial de arranque y C_{max} el par máximo;
- la segunda es inherente al par debido a la carga, que puede corregirse con un factor multiplicativo K_L ligado al tipo de carga, como en la tabla B1 adjunta.

Tabla B1: Valores del coeficiente K_L

Coeficiente de carga	Tipo de carga asimilable			
	Ascensor	Ventiladores	Bombas de pistón	Volante
K_L	1	0,33	0,5	0

Para caracterizar mejor el significado del coeficiente K_L asociamos al tipo de carga indicado el comportamiento del par que caracteriza a la fase de arranque con las siguientes hipótesis:

Ascensor = par de carga constante durante la aceleración

Ventiladores = par de carga con incremento con factor cuadrático durante la aceleración

Bombas de pistón = par de carga con incremento lineal durante la aceleración

Volante = par de carga nulo

Con estas hipótesis el par de aceleración puede expresarse como:

$$(C_M - C_L) = C_{ac} = 045 \times (C_{ia} + C_{max}) - K_L \times C_L$$

Estas hipótesis permiten obtener el tiempo de arranque según la fórmula:

$$t_a = \frac{2 \times \pi \times n_0 \times (J_M + J_L)}{60 \times C_{ac}}$$

El tiempo de arranque permite distinguir si se debe realizar un arranque normal o pesado y escoger correctamente los dispositivos de protección y maniobra.

Los parámetros relativos al motor, que se han citado anteriormente, los proporciona el fabricante del motor. En la tabla B2, a modo ilustrativo, se citan los valores

que dichos parámetros pueden asumir para motores asíncronos trifásicos de uso común y habitualmente presentes en el mercado.

Como es lógico los parámetros relativos a la carga caracterizan a cada aplicación individual y el encargado del proyecto debe conocerlos.

Tabla B2: Valores típicos de algunos parámetros eléctricos y mecánicos de un motor asíncrono trifásico

Potencia nominal [kW]	Velocidad a plena carga [rpm]	Relación Corriente de arranque Intensidad nominal	Par a plena carga, par nominal C_N [Nm]	Relación Par inicial de arranque Par nominal	Relación Par máximo Par nominal	Rendimiento a plena carga	Inercia del rotor $J \ 1/4GD^2$ [kgm ²]	Tiempo máximo de arranque Arranque directo [s]
75	1485	6,8	483	2,4	2,8	95	1,15	18
90	1486	7,1	579	2,7	2,9	95,2	1,4	18
110	1488	6,9	706	2,1	2,8	95,3	2	18
132	1487	6,7	848	2,2	2,7	95,5	2,3	18
160	1487	7,2	1028	2,4	2,9	96	2,9	18
200	1487	7,2	1285	2,5	2,9	96,2	3,5	20
250	1489	7,5	1603	2,2	2,6	96,2	5,7	20
315	1489	7,3	2022	2,3	2,8	96,4	6,9	20
355	1490	7,5	2277	2,4	2,7	96,6	6,9	20
400	1490	7,7	2564	2,5	2,8	96,6	8,4	20

En alusión a los datos de la tabla presentamos un ejemplo de cálculo del tiempo de arranque de un motor según las explicaciones teóricas antes desarrolladas.

Ejemplo:

Motor asíncrono trifásico de 4 polos	160 kW
Frecuencia	50 Hz
Velocidad nominal	1500 rpm
Velocidad a plena carga	1487 rpm
Momento de inercia del motor	$J_M = 2,9 \text{ kgm}^2$
Momento de inercia de la carga	$J_L = 60 \text{ kgm}^2$
Par de carga	$C_L = 1600 \text{ Nm}$
Par nominal del motor	$C_N = 1028 \text{ Nm}$
Par inicial de arranque	$C_{ia} = 2467 \text{ Nm}$ ($C_{ia} = 2,4 \times 1028$)
Par máximo	$C_{max} = 2981 \text{ Nm}$ ($C_{max} = 2,9 \times 1028$)

Carga con par constante $K_L = 1$

$$C_{ac} = 0,45 \times (C_{ia} + C_{max}) - K_L \times C_L = 0,45 \times (2467 + 2981) - (1 \times 1600) = 851,6 \text{ Nm}$$

$$\text{de donde: } t_a = \frac{2 \times \pi \times 1500 \times (2,9 + 60)}{60 \times 851,6} = 11,6 \text{ s}$$

Carga con par creciente en modo cuadrático $K_L = 0,33$

$$C_{ac} = 0,45 \times (C_{ia} + C_{max}) - K_L \times C_L = 0,45 \times (2467 + 2981) - (0,33 \times 1600) = 1923,6 \text{ Nm}$$

$$\text{de donde: } t_a = \frac{2 \times \pi \times 1500 \times (2,9 + 60)}{60 \times 1923,6} = 5,14 \text{ s}$$

Para ambos tipos de carga el tiempo de arranque estimado resulta idóneo con la indicación proporcionada por el fabricante y relativa al tiempo máximo admitido por arranque directo. De esta indicación también se puede tomar nota para valorar correctamente la elección del dispositivo de protección de sobrecarga.

Apéndice C: Funcionamiento con "falta de fase" y protección térmica

Entre las múltiples causas del funcionamiento con "falta de fase" de un motor asíncrono trifásico puede citarse por ejemplo el hecho de que la línea de alimentación tenga una fase interrumpida (funcionamiento con "falta de una fase de alimentación"), o que exista la interrupción de un devanado (funcionamiento con "falta de un devanado").

Las consecuencias genéricas y más comunes pueden ser un excesivo recalentamiento del motor, el funcionamiento con un fuerte zumbido y vibraciones de tipo mecánico.

A continuación veremos cómo el funcionamiento con "falta de fase" repercute en términos de potencia y corriente sobre el motor con los devanados conectados en estrella y en triángulo.

En un motor asíncrono trifásico, la relación entre los parámetros de funcionamiento nominales en las condiciones normales de funcionamiento (alimentación trifásica) se expresa mediante la siguiente fórmula:

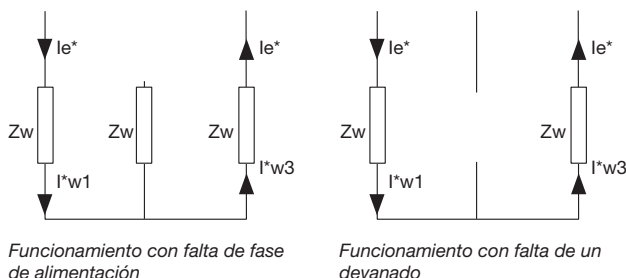
$$1) \quad P_e = \sqrt{3} \times V_n \times I_e \times \cos\varphi$$

Motor conectado en estrella

Comenzaremos analizando las condiciones de un motor conectado en estrella en el funcionamiento, sea con "falta de devanado", sea con "falta de fase de alimentación". Si a causa de un fallo el motor hubiera de funcionar con "falta de fase", la relación entre los parámetros de funcionamiento se expresa mediante la fórmula:

$$2) \quad P^* = V^* \times I^* \times \cos\varphi^*$$

Con la indicación "*" se entienden las magnitudes eléctricas referentes al funcionamiento con "falta de fase".



En la hipótesis de que, tanto en el funcionamiento normal como en el anómalo, el motor deba suministrar la misma potencia, manteniendo inalterada la tensión de alimentación ($V_n = V^*$) y el factor de potencia ($\cos\varphi = \cos\varphi^*$) igualando las relaciones 1) y 2) precedentes, se obtiene:

$$3) \quad \sqrt{3} \times V_n \times I_e \times \cos\varphi = V^* \times I^* \times \cos\varphi^* \quad \leftarrow$$

$$\rightarrow \sqrt{3} \times I_e = I^* \rightarrow I^* = 1,73 \times I_e$$

Del análisis de la fórmula obtenida se deduce que en el funcionamiento con "falta de fase", cuando se solicita al motor la misma potencia que suministra en el funcionamiento trifásico, la corriente " I_e^* " que absorbe el motor resulta ser $\sqrt{3}$ veces la corriente " I_e " solicitada en el funcionamiento normal. Por lo tanto, un motor en el funcionamiento con "falta de fase" debería absorber una corriente que sería un 73% mayor que la intensidad nominal en el funcionamiento trifásico para suministrar la misma potencia. Es decir, debería trabajar en condiciones de sobrecarga que resultarían críticas a nivel de recalentamiento y en general para la vida eléctrica del propio motor.

De hecho, el funcionamiento con corrientes tan elevadas se impide con la presencia de la protección térmica, regulada como umbral de disparo sobre la intensidad nominal " I_e " del motor. Dicha protección interviene salvaguardando el motor de los efectos debidos a una corriente absorbida superior al umbral " I_e " ajustado.

Suponiendo ahora que en las dos condiciones de funcionamiento (alimentación normal en trifásico y con "falta de fase") el motor absorba el mismo valor de corriente " I_e ", manteniendo inalterada la tensión de alimentación y el factor de potencia, veamos la relación entre la potencia suministrable en los dos casos:

Determinando el valor de la corriente de las relaciones 1) y 2) precedentes e igualando las dos relaciones, se obtiene:

$$4) \quad \frac{P_e}{\sqrt{3} \times V_n \times \cos\varphi} = \frac{P^*}{V^* \times \cos\varphi^*} \quad \leftarrow$$

$$\rightarrow \frac{P_e}{\sqrt{3}} = P^* \rightarrow 0,58 \times P_e = P^*$$

es decir, con "falta de fase" y con absorción de la corriente " I_e ", el motor suministra una potencia que se reduce un 42% respecto de la potencia nominal en trifásico.

En el motor con devanados conectados en estrella, la corriente asociada a los devanados del motor es la misma que la asociada a la protección térmica en cualquier condición de funcionamiento. Así pues, el relé de sobrecarga protege el motor de una absorción mayor respecto de la intensidad nominal " I_e " en las dos modalidades de funcionamiento consideradas.

En este caso, si durante el funcionamiento normal se verificase la pérdida de una fase en la línea de alimentación o la pérdida de un devanado, el motor trifásico pasaría a funcionar en monofásico, ya que una única corriente recorrería los devanados (no hay diferencia de valor ni de fase).

Por lo tanto, en el funcionamiento genérico con "falta de fase" el par motor se reduce y, si el par de resistencia se mantiene constante, se obtiene una reducción de la velocidad del motor.

Esto conlleva un aumento del deslizamiento con el consiguiente incremento de la corriente absorbida que provoca un recalentamiento del motor muy perjudicial. Hay que señalar que para el principio de funcionamiento del campo magnético giratorio, en el funcionamiento monofásico de un motor asíncrono trifásico no existe un par de arranque, por lo que resulta imposible arrancar el motor con "falta de fase".

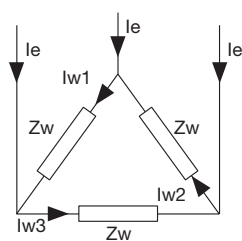
Si, en cambio, se pone el motor en rotación con cualquier artificio, entonces éste se pondrá a girar en el mismo sentido impuesto por la acción externa, funcionando con los límites y los problemas anteriormente expuestos.

Motor conectado en triángulo

En el caso de un motor conectado en triángulo, la comparación entre las relaciones 1 y 2 resulta válida en el funcionamiento con "falta de fase de alimentación".

Como ya se ha dicho, en el funcionamiento normal en trifásico el motor absorbe en línea la intensidad nominal "I_e", lo que significa que en los tres devanados conectados en triángulo circula una corriente igual a:

$$5) \quad I_{w1} = I_{w2} = I_{w3} = I_w = \frac{I_e}{\sqrt{3}}$$

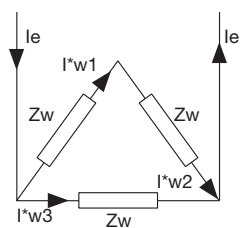


Funcionamiento normal

En el funcionamiento con "falta de fase de alimentación", suponiendo que el motor absorba en línea siempre la intensidad nominal "I_e", en las fases se da la siguiente distribución de la corriente:

$$6a) \quad I^*_{w1} = I^*_{w2} = \frac{V}{2 \times Z_w}$$

$$6b) \quad I^*_{w3} = \frac{V}{Z_w}$$



Funcionamiento con falta de fase de alimentación

Expresando la tensión en función de la impedancia total de los devanados, se obtiene:

$$7) \quad V = \frac{2 \times Z_w}{3} \times I_e \quad (\text{la impedancia equivalente}$$

$$\text{sería:} \quad \frac{(Z_w + Z_w) \times Z_w}{(Z_w + Z_w) + Z_w} = \frac{2 \times Z_w}{3})$$

La relación 7 permite, al sustituirla en las expresiones 6a y 6b precedentes, despejar la corriente de los devanados en función de la intensidad nominal:

$$8a) \quad I^*_{w1} = I^*_{w2} = \frac{1}{2 \times Z_w} \times \frac{2 \times Z_w}{3} \times I_e = \frac{I_e}{3}$$

$$8b) \quad I^*_{w3} = \frac{1}{Z_w} \times \frac{2 \times Z_w}{3} \times I_e = \frac{2}{3} \times I_e$$

Contrastando las corrientes de los devanados determinadas en el funcionamiento normal, expresadas en la relación 5, y en el funcionamiento con "falta de fase de alimentación", expresadas en las relaciones 8, se obtienen las siguientes relaciones:

$$9a) \quad \frac{I_{w1}}{I^*_{w1}} = \frac{I_{w2}}{I^*_{w2}} = \frac{I_e}{\frac{I_e}{\sqrt{3}}} \times \frac{3}{I_e} = \frac{3}{\sqrt{3}} = 1,73 \quad \leftarrow$$

$$\rightarrow \frac{I^*_{w1}}{I_{w1}} = \frac{I^*_{w2}}{I_{w2}} = 0,578$$

$$9b) \quad \frac{I_{w3}}{I^*_{w3}} = \frac{I_e}{\frac{2}{3} I_e} \times \frac{3}{2 \times I_e} = \frac{3}{2 \times \sqrt{3}} = 0,876 \quad \leftarrow$$

$$\rightarrow \frac{I^*_{w3}}{I_{w3}} = 1,153$$

Como se ha dicho anteriormente, en el funcionamiento trifásico nominal el motor absorbe

la corriente "I_e" en línea y la corriente $I_w = \frac{I_e}{\sqrt{3}}$

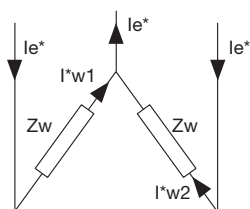
en los devanados, por lo tanto de las relaciones 9 se deduce cómo en el funcionamiento con "falta de fase de alimentación", aunque la corriente "I_e" sea absorbida en línea, uno de los devanados (en el ejemplo el devanado 3) absorbe cerca del 15% más respecto a lo que sucede en el funcionamiento normal.

Este análisis lleva a la conclusión de que el relé de sobrecarga no interviene porque se ve afectado por la corriente "I_e", aunque en realidad un devanado resulta sobrecargado (15% más respecto al funcionamiento normal) sin que la protección térmica lo advierta. Por lo tanto el motor podría no estar protegido adecuadamente.

En la "falta de fase de alimentación", el funcionamiento en igualdad de potencia suministrada puede ser tratado con las mismas consideraciones estipuladas para el motor conectado en estrella según la relación 4.

En el caso del motor conectado en triángulo y funcionamiento con "falta de devanado", la comparación entre las relaciones 1 y 2 deja de ser válida; debe considerarse como nuevo elemento de comparación la relación:

$$2a) \quad P^* = 2 \times V^* \times I_e^* \times \cos\varphi^*$$



Funcionamiento con falta de un devanado

Suponiendo que el motor deba suministrar la misma potencia, manteniendo inalterada la tensión de alimentación ($V_n = V^*$) y el factor de potencia ($\cos\varphi = \cos\varphi^*$), e igualando las relaciones 1) y 2a) precedentes se obtiene:

$$10) \quad \sqrt{3} \times V_n \times I_e \times \cos\varphi = 2 \times V^* \times I_e^* \times \cos\varphi^* \quad \leftarrow$$

$$\sqrt{3} \times I_e = 2 \times I_e^* \quad \rightarrow \quad I_e^* = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_e \quad I_e^* = 0,866 \times I_e$$

" I_e^* " es la corriente que absorbe el motor y que recorre el único devanado en el funcionamiento con "falta de un devanado" ($I_e^* = I_w^*$), y es también la corriente relativa a la protección térmica. En el funcionamiento trifásico normal, la corriente que recorre el devanado tiene un valor igual a $I_w = \frac{I_e}{\sqrt{3}}$, mientras la corriente relativa a la

protección térmica es precisamente " I_e ".

Introduciendo este concepto en la fórmula 10, se obtiene la siguiente relación:

$$11) \quad \sqrt{3} \times \sqrt{3} \times I_w = 2 \times I_w^* \quad \leftarrow$$

$$\rightarrow I_w^* = \frac{3}{2} \times I_w = 1,5 \times I_w$$

De ella se extrae que en este funcionamiento anómalo una corriente " I_w^* " atraviesa el devanado del motor, que resulta ser mayor que la corriente máxima admitida en el devanado en el funcionamiento normal, sin que la protección térmica intervenga ya que, como se ve en la 10, es atravesada por una corriente inferior con respecto a la nominal del motor en su funcionamiento normal.

Está claro que este hecho conlleva un funcionamiento particularmente exigente para el motor.

En el supuesto de que el motor absorbiera en línea la misma intensidad nominal " I_e " del funcionamiento normal, igualando la expresión de la corriente obtenible de las relaciones 1 y 2a, se obtiene, manteniendo inalteradas la tensión de alimentación ($V_n = V^*$) y el factor de potencia ($\cos\varphi = \cos\varphi^*$), la siguiente relación:

$$12) \quad \frac{P}{\sqrt{3} \times V_n \times \cos\varphi} = \frac{P^*}{2 \times V^* \times \cos\varphi^*} \quad \leftarrow$$

$$\rightarrow P^* = \frac{2 \times P}{\sqrt{3}} = 1,15 \times P$$

El motor suministra entonces en el funcionamiento con "falta de devanado" una potencia un 15% superior a la suministrada en el funcionamiento normal. Esto requiere en los devanados una corriente mayor en torno a un 73% de la corriente que afecta a los devanados en el funcionamiento trifásico normal. Esta condición resulta aún más severa que la anterior, y no provoca la intervención de la protección térmica ya que supuestamente se ve afectada por la intensidad nominal " I_e ".

En el motor con devanados conectados en triángulo, el funcionamiento con la pérdida de una fase de alimentación hace que el motor funcione como monofásico, ya que corrientes de valores distintos recorren los devanados, pero con la misma diferencia de fase.

Esto no permite la creación del campo magnético giratorio, de ahí que el motor ni siquiera puede arrancarse salvo forzando la rotación inicial.

En cambio, el funcionamiento con pérdida de un devanado hace que el motor asíncrono trabaje como bifásico; de hecho, corrientes de igual valor recorren los

devanados ($|I_w| = \frac{M}{|Z_w|}$) pero con un desfase diferente ($\phi_1 - \phi_2 = \varphi_w$).

La explicación precedente ilustra las condiciones de funcionamiento del motor con "falta de fase" mediante un enfoque teórico y basado en las condiciones de funcionamiento con igual potencia suministrada e igual corriente absorbida respecto al funcionamiento trifásico normal. Las condiciones de funcionamiento reales se caracterizan por la aparición de armónicos que generan campos magnéticos giratorios parasitarios directos o inversos que influyen en el rendimiento, la velocidad de rotación y la potencia disponible. Por ello, la situación de funcionamiento real no se presta a una explicación lineal y simple como se ha expuesto anteriormente, aunque igualmente resulta válida para indicar cuáles son las corrientes que afectan al motor y para entender que el funcionamiento con "falta de fase" genera consecuencias que llevan al motor a sufrir daños.

Apéndice D: Los distintos tipos de servicio

Con el término servicio se define el ciclo de carga al que está sometida la máquina, incluidos si cabe los periodos de arranque, frenado eléctrico, funcionamiento en vacío y reposo, además de su duración y su secuencia en el tiempo. El servicio, entendido como término genérico, puede tipificarse por ejemplo como servicio continuo, de duración limitada o periódico. La relación porcentual entre la duración de funcionamiento con carga y la duración total de un ciclo se define como relación de intermitencia.

Es responsabilidad del comprador especificar el servicio. Si el comprador no lo especifica, el fabricante debe presuponer la aplicación del tipo de servicio S1 (servicio continuo). El tipo de servicio debe designarse con la abreviatura apropiada y el comprador puede describirlo basándose en las diversas clasificaciones según las indicaciones que se describen a continuación.

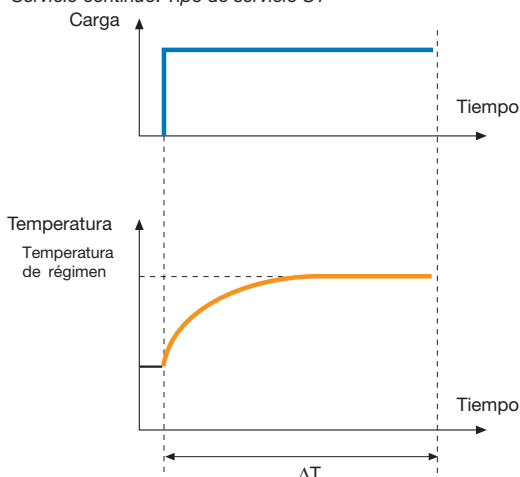
Atribuyendo al motor las características nominales (valores de las magnitudes atribuidas, generalmente por el fabricante, para una condición de funcionamiento específica de una máquina) el fabricante debe escoger una de las clases de servicio. Si no se declara ninguna designación, se aplican las características nominales asignadas al tipo de servicio continuo. A continuación, sobre la base de la clasificación proporcionada en la norma IEC 60034-1, damos algunas indicaciones relativas a los tipos de servicio tomados habitualmente como referencia para indicar las características nominales del motor.

Tipo de servicio continuo: para un motor correspondiente a este tipo de servicio, se especifican las características nominales a las que la máquina puede funcionar por un periodo ilimitado.

Esta clase de características nominales corresponde al tipo de servicio identificado como S1.

El tipo de servicio S1 se define como el funcionamiento a carga constante de duración suficiente que permite a la máquina alcanzar el equilibrio térmico.

Servicio continuo: Tipo de servicio S1



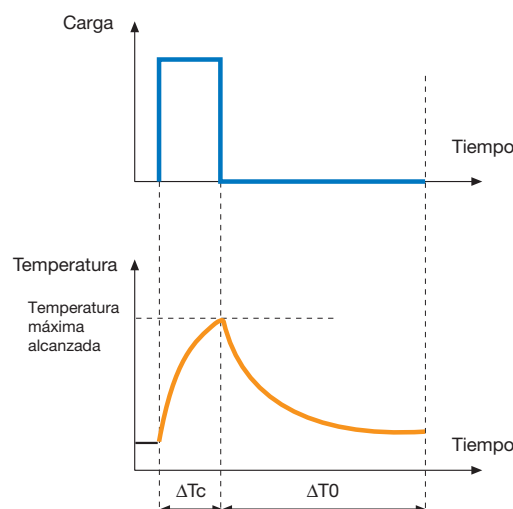
ΔT : Tiempo suficiente que permita a la máquina alcanzar el equilibrio térmico

Tipo de servicio de duración limitada: para un motor correspondiente a este tipo de servicio, se especifican las características nominales a las que la máquina, arrancada a temperatura ambiente, puede funcionar por un periodo de duración limitada.

Esta clase de características nominales corresponde al tipo de servicio identificado como S2.

El tipo de servicio S2 se define como el funcionamiento a carga constante por un periodo de tiempo determinado, inferior al necesario para alcanzar el equilibrio térmico, seguido de un tiempo de reposo de duración suficiente para restablecer el equilibrio entre la temperatura de la máquina y la del líquido de refrigeración. Un marcado completo aporta la sigla del tipo de servicio seguida de la indicación de la duración del servicio (S2 40minutos).

Servicio de duración limitada: Tipo de servicio S2

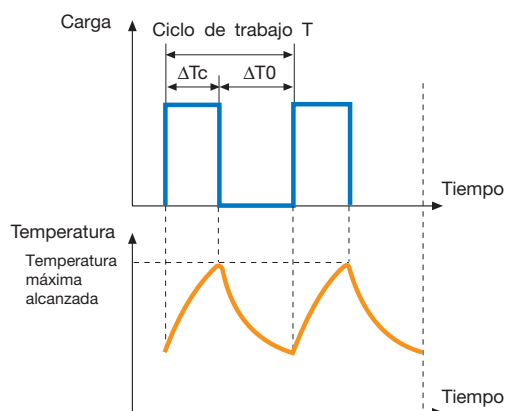


ΔT_c : tiempo de funcionamiento a carga constante
 ΔT_0 : tiempo de reposo

Tipo de servicio periódico: para un motor correspondiente a este tipo de servicio, se especifican las características nominales a las que la máquina puede funcionar con ciclos periódicos. En este servicio periódico el ciclo de carga no permite alcanzar el equilibrio térmico. Este conjunto de características nominales está ligado a una clase de servicio entre S3 y S8, y el marcado completo permite identificar el tipo de servicio periódico. Si no se especifica lo contrario, la duración de un ciclo de servicio debe ser de 10 minutos y la relación de intermitencia debe tener uno de los siguientes valores: 15%, 25%, 40%, 60%. La relación de intermitencia se define como la relación porcentual entre la duración de funcionamiento con carga, incluidos los arranques y los frenados eléctricos, y la duración de un ciclo completo de trabajo.

El tipo de servicio S3 se define como la secuencia de ciclos de funcionamiento idénticos, cada uno con un tiempo de funcionamiento a carga constante y un tiempo de reposo. Se omite la contribución al recalentamiento que da la fase de arranque. Un marcado completo aporta la sigla del tipo de servicio seguida de la indicación de la relación de intermitencia (S3 30%).

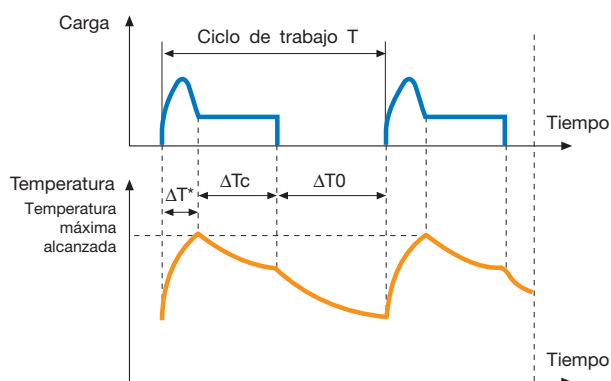
Servicio intermitente periódico: Tipo de servicio S3



ΔT_c : tiempo de funcionamiento a carga constante
 ΔT_0 : tiempo de reposo
 Relación de intermitencia = $\Delta T_c / T$

El tipo de servicio S4 se define como la secuencia de ciclos de funcionamiento idénticos, cada uno con un tiempo de arranque no despreciable, un tiempo de funcionamiento a carga constante y un tiempo de reposo. Un marcado completo aporta la sigla del tipo de servicio seguida de la indicación de la relación de intermitencia entre el momento de inercia del motor J_M y el momento de inercia de la carga J_C , estos dos últimos en referencia al eje del motor (S4 20% $J_M = 0,15 \text{ kg m}^2$ $J_C = 0,7 \text{ kg m}^2$).

Servicio intermitente periódico con arranque: Tipo de servicio S4

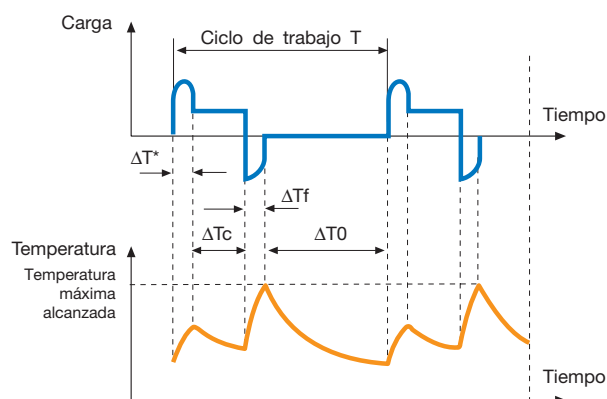


ΔT^* : tiempo de arranque/aceleración
 ΔT_c : tiempo de funcionamiento a carga constante
 ΔT_0 : tiempo de reposo
 Relación de intermitencia = $(\Delta T^* + \Delta T_c) / T$

El tipo de servicio S5 se define como la secuencia de ciclos de funcionamiento idénticos, cada uno con un tiempo de arranque, un tiempo de funcionamiento a carga constante, un tiempo de frenado eléctrico rápido y un tiempo de reposo.

El marcado completo hace referencia al tipo de servicio y aporta los mismos tipos de indicaciones que en el caso anterior.

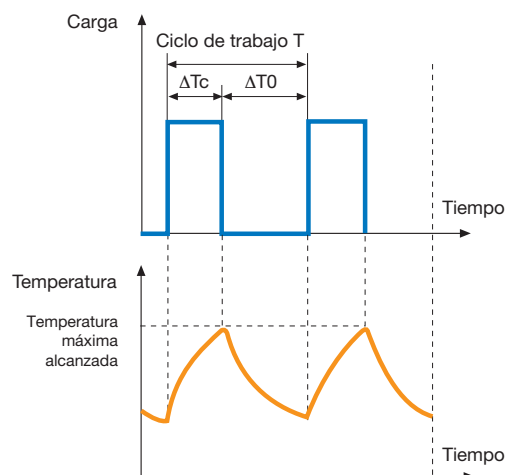
Servicio intermitente periódico con frenado eléctrico: Tipo de servicio S5



ΔT^* : tiempo de arranque/aceleración
 ΔT_c : tiempo de funcionamiento a carga constante
 ΔT_f : tiempo de frenado eléctrico
 ΔT_0 : tiempo de reposo
 Relación de intermitencia = $(\Delta T^* + \Delta T_c + \Delta T_f) / T$

El tipo de servicio S6 se define como la secuencia de ciclos de funcionamiento idénticos, cada uno con un tiempo de funcionamiento a carga constante y un tiempo de funcionamiento en vacío. No existe ningún tiempo de reposo. Un marcado completo aporta la sigla del tipo de servicio seguida de la indicación de la relación de intermitencia (S6 30%).

Servicio ininterrumpido periódico con carga intermitente: Tipo de servicio S6

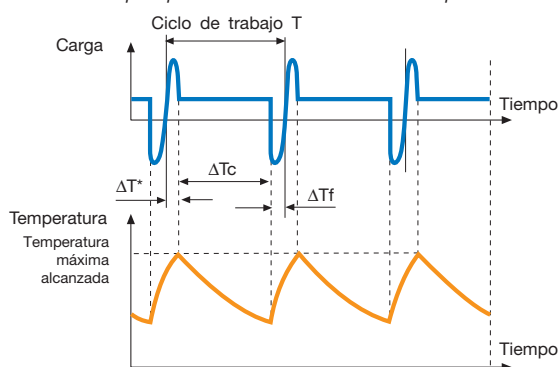


ΔT_c : tiempo de funcionamiento a carga constante
 ΔT_0 : tiempo en vacío
 Relación de intermitencia = $\Delta T_c / \Delta T_0$

El tipo de servicio S7 se define como la secuencia de ciclos de funcionamiento idénticos, cada uno con un tiempo de arranque, un tiempo de funcionamiento a carga constante y un tiempo de frenado eléctrico.

No existe ningún periodo de reposo. Un marcado completo aporta la sigla del tipo de servicio seguida de la indicación del momento de inercia del motor J_M y del momento de inercia de la carga J_L (S7 $J_M = 0,4 \text{ kg m}^2$ $J_L = 7,5 \text{ kg m}^2$).

Servicio ininterrumpido periódico con frenado eléctrico: Tipo de servicio S7

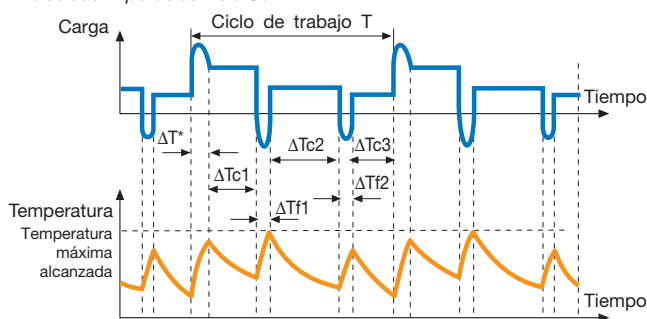


ΔT^* : tiempo de arranque/acceleración
 ΔT_c : tiempo de funcionamiento a carga constante
 ΔT_f : tiempo de frenado eléctrico
 Relación de intermitencia = 1

El tipo de servicio S8 se define como la secuencia de ciclos de funcionamiento idénticos, cada uno con un tiempo de funcionamiento a carga constante con velocidad de rotación preestablecida, seguido de uno o más tiempos de funcionamiento con otras cargas constantes correspondientes a distintas velocidades de rotación.

No existe ningún tiempo de reposo. Un marcado completo aporta la sigla del tipo de servicio seguida de la indicación del momento de inercia del motor J_M y del momento de inercia de la carga J_L , de la potencia de la carga, la velocidad y la relación de intermitencia, para cada régimen de velocidad (S8 $J_M = 0,7 \text{ kg m}^2$ $J_L = 8 \text{ kg m}^2$ 25 kW 800 rpm 25% 40 kW 1250 rpm 20% 25 kW 1000 rpm 55%).

Servicio ininterrumpido periódico con variaciones relacionadas de carga y velocidad: Tipo de servicio S8



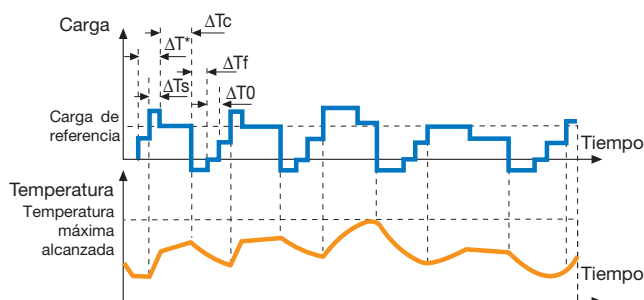
ΔT^* : tiempo de arranque/acceleración
 ΔT_{c1} ; ΔT_{c2} ; ΔT_{c3} : tiempo de funcionamiento a carga constante
 ΔT_{f1} ; ΔT_{f2} : tiempo de frenado eléctrico
 Relación de intermitencia = $(\Delta T^* + \Delta T_{c1})/T$; $(\Delta T_{f1} + \Delta T_{c2})/T$; $(\Delta T_{f2} + \Delta T_{c3})/T$

Tipo de servicio no periódico: para un motor correspondiente a este tipo de servicio, se especifican las características nominales a las que la máquina puede funcionar en modo no periódico. Esta clase de características nominales corresponde al tipo de servicio identificado como S9.

El tipo de servicio S9 se define como el funcionamiento en el que generalmente la carga y la velocidad varían de forma no periódica en el campo de funcionamiento admisible.

Este servicio comprende sobrecargas frecuentemente aplicadas que pueden ser considerablemente superiores a los valores de plena carga.

Servicio con variaciones no periódicas de carga y de velocidad: Tipo de servicio S9



ΔT^* : tiempo de arranque/acceleración
 ΔT_s : tiempo de funcionamiento con sobrecarga
 ΔT_c : tiempo de funcionamiento a carga constante
 ΔT_f : tiempo de frenado eléctrico
 ΔT_0 : tiempo de reposo

Tipo de servicio para cargas distintas constantes: para un motor correspondiente a este tipo de servicio, se especifican las características nominales a las que la máquina puede funcionar con un número específico de cargas distintas durante un periodo de tiempo que permita a la máquina alcanzar el equilibrio térmico.

La carga máxima admisible en un ciclo debe tener en consideración todas las partes de la máquina (el sistema de aislamiento, los cojinetes u otras partes relacionadas con la dilatación térmica).

La carga máxima no debe exceder 1,15 veces el valor de la carga basada en el tipo de servicio S1.

Pueden darse otras limitaciones para la carga máxima en términos de la limitación de la temperatura del devanado. La carga mínima puede tener valor cero cuando la máquina funciona en vacío o se encuentra en estado de reposo.

Esta clase de características nominales corresponde al tipo de servicio identificado como S10.

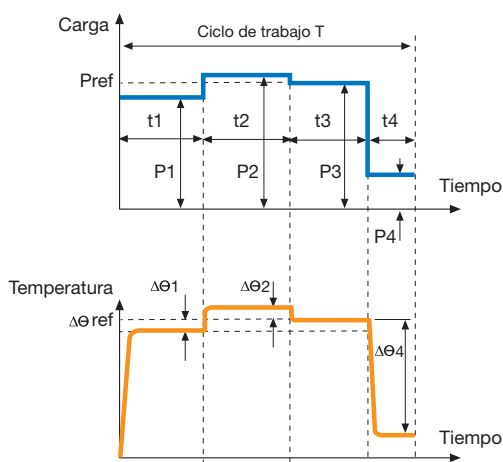
El tipo de servicio S10 se define como el funcionamiento que consiste en un número específico de valores distintos de carga manteniendo cada valor durante un

tiempo suficiente que permita a la máquina alcanzar el equilibrio térmico. La carga mínima durante un ciclo de servicio puede ser nula y relativa a una condición de vacío o de estado de reposo. Un marcado completo aporta la sigla del tipo de servicio seguida de la indicación de la cantidad $p/\Delta t$, relativa a la carga parcial y a su duración, de la cantidad T_L , que representa la vida térmica prevista para el sistema de aislamiento expresada en valor relativo respecto a la vida térmica esperada en el caso del tipo de servicio S1 con potencia nominal, y de la cantidad r que indica la carga en fase de reposo (S10 $p/\Delta t = 1,1/0,4; 1/0,3; 0,9/0,2; r/0,1 T_L = 0,6$).

Tipo de servicio para carga equivalente: para un motor correspondiente a este tipo de servicio, se especifican las características nominales a las que, al final de las pruebas, la máquina puede funcionar a carga constante hasta alcanzar el equilibrio térmico y que conducen a la misma sobretensión del devanado estático que se obtendría al finalizar la prueba para el tipo de servicio especificado.

Esta clase de características nominales, si son aplicables, corresponde al tipo de servicio identificado como "equ".

Servicio con cargas constantes distintas: Tipo de servicio S10



$\Delta\theta_1; \Delta\theta_2; \Delta\theta_4$: diferencia entre la sobretensión del devanado para cada una de las distintas cargas en un ciclo y la sobretensión basada en el tipo de servicio S1 con carga de referencia

$\Delta\theta_{ref}$: temperatura a la carga de referencia basado en el tipo de servicio S1

$t_1; t_2; t_3; t_4$: duración de una carga constante en un ciclo

$P_1; P_2; P_3; P_4$: carga constante en un ciclo

Pref: carga de referencia, basada en el tipo de servicio S1

Apéndice E: Indicaciones sobre la coordinación UL

Este apéndice tiene el objetivo de proporcionar una breve panorámica y una rápida indicación sobre las principales modalidades y prescripciones relativas a la coordinación de motores para construcciones o proyectos destinados al mercado norteamericano.

En el sector de la automatización, el mercado europeo con referencias normativas IEC o EN y el americano con referencias normativas UL, tienen bases normativas y jurídicas muy distintas, por lo que todos los conceptos expuestos en los capítulos precedentes pierden validez si se clasifican para el ámbito americano.

La normativa americana de referencia para la coordinación de motores es la UL 508 "Industrial Control Equipment" (Equipos de Control Industrial); los requisitos de esta norma se aplican a equipos industriales de control y accesorios relativos para el arranque, paro, regulación, control o protección de motores eléctricos.

Generalidades

Las prescripciones normativas americanas no tratan el argumento de la coordinación de motores según los parámetros y las definiciones analizadas anteriormente y facilitadas por la normativa IEC o EN, por lo tanto no existe la clasificación de coordinación de "tipo 1" y "tipo 2" o de "arranque normal" y "arranque pesado", pero describen las modalidades para la ejecución de los "combination motor controllers" (controladores combinados de motores), identificados a continuación con el término español de arrancadores, que se clasifican en distintas tipologías llamadas "construction types" (tipos de construcción).

El arrancador es un dispositivo o una combinación de dispositivos diseñados para arrancar o parar un motor a través de la interrupción y el establecimiento de la corriente del motor. Normalmente está constituido por uno o más dispositivos ensamblados con función de desconexión, de protección del conductor y de

los componentes del circuito (contra cortocircuitos y defecto a tierra), de maniobra del motor (generalmente con un contactor) y de protección contra sobrecargas del motor.

Los dispositivos de desconexión del circuito y de protección (contra cortocircuitos y defecto a tierra) del circuito de derivación del motor normalmente están constituidos por un interruptor. Dicho interruptor puede ser un dispositivo con intervención instantánea o con intervención a tiempo inverso. El interruptor con intervención instantánea garantiza la protección del cortocircuito, mientras que el interruptor protegido con intervención a tiempo inverso proporciona tanto la protección contra cortocircuitos como contra sobrecargas.

La función de "magnetic motor controller" (controlador magnético del motor) es generalmente identificable con un contactor. El relé de sobrecarga normalmente garantiza la protección en condiciones sobrecarga.

La norma facilita prescripciones muy rigurosas con relación a las modalidades y a los valores de prueba para las que también reviste gran importancia el concepto de "enclosure" (envolvente), es decir, el cubículo en cuyo interior se aloja el controlador combinado de motor.

Los distintos tipos de construcción se identifican a partir de los distintos componentes admitidos y de las modalidades de reparto de las funciones básicas de protección y control.

La clasificación prevé construcciones de tipo A-B-C-D-E-F y viene especificada en una tabla que, en función del tipo, facilita indicaciones relativas a los distintos dispositivos admitidos, a la norma que define las características y la función que deben desarrollar.

Los tipos de construcción más comunes, caracterizados por el hecho de tener componentes individuales sustituibles con otros componentes con características

idóneas, son los clasificados de la A a la D, mientras que los que prevén la utilización del interruptor son los clasificados como tipo C y D, que en detalle prevén la utilización de los siguientes componentes:

Tipo C

- "Inverse time circuit breaker" (interruptor automático de tiempo inverso) identificable como un interruptor termomagnético, de conformidad con la norma UL 489 y con función de desconexión y protección de los circuitos.
- "Magnetic or solid state motor controller" (controlador magnético o de estado sólido del motor), identificable como un contactor de conformidad con la norma UL 508 y con la función de controlar ("maniobrar") el motor.
- "Overload relay" (relé de sobrecarga) identificable con un dispositivo de protección térmica de conformidad con la norma UL508 y con función definida como "motor overload" (sobrecarga del motor).

Tipo D

- "Instantaneous trip circuit breaker" (interruptor automático de disparo instantáneo), identificable como un interruptor solo magnético, de conformidad con la norma UL 489 y con función de desconexión y protección de los circuitos.
- "Magnetic or solid state motor controller" (controlador magnético o de estado sólido del motor), identificable como un contactor de conformidad con la norma UL 508 y con la función de controlar ("maniobrar") el motor.
- "Overload relay" (relé de sobrecarga) identificable con un dispositivo de protección térmica de conformidad con la norma UL508 y con función definida como "motor overload" (sobrecarga del motor).

Un tipo particular de construcción es el que se identifica como Tipo E, llamado "Self-Protected Control Device", es decir, un dispositivo de control y maniobra del motor autoprotegido, introducido en la norma UL a partir de 1990.

Este dispositivo de control de **Tipo E** es un arrancador combinado, "combination motor controller", manual y autoprotegido que facilita tanto la protección contra cortocircuitos como contra la sobrecarga en un único dispositivo compacto.

Este tipo no requiere interruptores o fusibles aguas arriba. En este tipo de fabricación todas las funciones de "Disconnect", "Branch Circuit Protection", "Motor Control" y "Motor Overload", es decir, de desconexión, protección de circuitos, maniobra de motores y protección de sobrecarga, son ejecutadas por un único dispositivo que responde a las prescripciones de la norma UL 508.

Utilizando un contactor asociado al Tipo E se origina una nueva tipología de construcción que en 2002 fue introducida en la norma y que está clasificada como **Tipo F**, pero dicho dispositivo no se considera autoprotegido.

Las construcciones de tipo A a la D y de tipo F, en lo referente al cortocircuito, se prueban con las mismas condiciones y modalidades de prueba, mientras que para la de tipo E, la norma facilita modalidades de prueba específicas.

Hagamos ahora una breve profundización, sobre algunos elementos que caracterizan los componentes de las distintas funciones de maniobra y protección; comenzaremos con la definición de "Enclosure" o envolvente, tal y como aparece en la norma UL 508.

Envolvente

Una envolvente para equipos industriales de control se construirá y ensamblará de forma que posea la resistencia y solidez necesarias para resistir los esfuerzos a los que pudiera verse sometida, sin sufrir daños totales o parciales que pudieran causar peligro de incendio, sacudidas eléctricas o lesiones a personas debidas a reducción de las distancias, aflojamiento de las fijaciones, desplazamiento de partes u otros defectos graves.

Prácticamente éstas son las características que debe tener el cubículo dentro del cual se posiciona el controlador combinado de motores; el receptáculo constituye una parte integrante del controlador combinado de motores y condiciona sus prestaciones.

Protección contra sobrecargas

Para cada motor debe preverse una protección individual contra sobrecargas. Pueden utilizarse relés externos de sobrecarga, mecánicos o eléctricos, o los relés térmicos de los guardamotores "Tipo E"; en cualquier caso, toda esta aparaenta ha de ser de conformidad con la norma UL 508. La regulación de la protección contra sobrecargas no debe ser superior al 115% de la especificación de intensidad nominal del motor a plena carga.

Protección contra cortocircuitos

Pueden utilizarse interruptores automáticos (solo magnéticos o termomagnéticos) conformes a la norma UL 489 que, en combinación con un contactor y una protección contra sobrecargas, permiten obtener un sistema de protección del motor de tipo C o D conforme a la norma UL 508, o bien interruptores identificados en la norma UL 508 como "self-protected combination motor controller" (controladores combinados de motores autoprotegidos).

Función de mando

Pueden utilizarse como elementos de mando los contactores genéricos descritos en la norma UL 508, o bien dispositivos más complejos como accionamientos o inversores conformes a la norma UL 508C. El contactor debe escogerse en función del tipo de carga que controlará y deberá tener un calibre (es decir, una capacidad de corriente) no inferior a la corriente o a la suma de las corrientes de los motores, determinadas según los valores estandarizados y facilitados en la norma UL 508.

Glosario

I_r	corriente de ajuste de la protección térmica
T_i	tiempo de disparo de la protección térmica
I_e	intensidad nominal del motor
I_w	corriente en los devanados del motor en condiciones nominales
I_w^*	corriente en los devanados del motor en condiciones anómalas
V_L	tensión concatenada (fase-fase) de red
Z_w	impedancia del devanado
P_e	potencia nominal del motor
I_{ia}	corriente inicial de arranque ($12 \times I_e$)
I_{arr}	corriente de arranque $7,2 \times I_e$
I_3	umbral de intervención magnética
I_n	intensidad nominal del relé de protección
η	rendimiento - eficiencia
$\cos\varphi$	factor de potencia
Y	conexión en estrella
Δ	conexión en triángulo
n_0	velocidad de sincronismo o del campo magnético del estátor
f	frecuencia de la red de alimentación
p	número de pares de polos
n	velocidad de rotación del rotor
nd	velocidad de deslizamiento
s	deslizamiento
C_M	par motor
C_L	par de resistencia
C_a	par de arranque
t_a	tiempo de arranque
J_M	momento de inercia del motor
J_L	momento de inercia de la carga
ω	velocidad angular
$\frac{d\omega}{dt}$	aceleración angular
C_{ia}	par al inicio del arranque
C_{max}	par máximo
C_{ac}	par de aceleración
K_L	factor multiplicativo
$S..$	tipo de servicio
ϕ_I	desfase de la corriente
φ_V	desfase de la tensión
φ_w	desfase de la impedancia del devanado

Contacte con nosotros

Asea Brown Boveri, S.A.
Low Voltage Products
Torrent de l'Olla 220
08012 Barcelona
Tel. 93 484 21 21
Fax 93 484 21 90
www.abb.es/bajatension



1TXA007106G0701-001209