



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

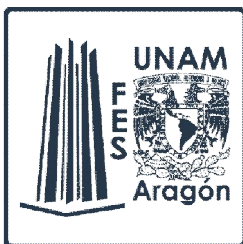
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN

COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL
ELECTROMECAÁNICO CON LOS DE ESTADO SOLIDO

TÉSIS
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

PRESENTA
ESTEBAN RAMÍREZ SÁNCHEZ

ASESOR
ING. ABEL VERDE CRUZ



Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

Agradecimientos

A dios
Porque siempre está a mi lado.

A mis maestros
Por el tiempo y dedicación.

A mis papas
Por todos sus consejos y su apoyo.

A mi esposa
Por estar a mi lado en todo momento y darme tres grandes bendiciones.

Y en especial
A todos los que me apoyaron en seguir mis estudios cuando muchos me dieron la espalda.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

“No hay perdedores solamente conformistas”.
Esteban Ramírez

“Ve hacia arriba, pero nunca olvides de dónde vienes”.
Esteban Ramírez

“No temas por lo que va a pasar, mejor arriégate”.
Esteban Ramírez

“Si buscas resultados distintos no hagas siempre lo mismo”.
Albert Einstein

“Un hombre solo tiene derecho a mirar a otro hacia abajo cuando ha de ayudarlo a levantarse”.
Gabriel García Márquez

“El fracaso es una gran oportunidad para empezar otra vez con más inteligencia”.
Henry Ford

“Que hablen mal de uno es espantoso, pero hay algo peor: que no hablen”.
Oscar Wilde

Introducción

Con el paso del tiempo se ha tratado de ser más eficiente la producción en las fábricas a través de diferentes componentes, uno de estos es el motor, el cual es capaz de transformar la energía eléctrica en mecánica por lo que es una pieza fundamental en el proceso, ya que todas las partes en un proceso son importantes.

El motor jaula de ardilla es el más común en la industria y el que menos cambios ha sufrido con el paso del tiempo ya que las dos partes fundamentales, rotor y estator se siguen construyendo igual que en sus inicios.

Los motores se han ido modificando con base a las necesidades de la aplicación: voltaje, velocidad, torque, conexión, montaje, acoplamiento, etc., por lo que hay tener los conocimientos básicos para seleccionar un motor.

Por lo que no hay que olvidar la protección del motor ya que una mala selección de los componentes ocasionara paros innecesarios, daños al motor irreversibles, daños a las partes mecánicas, pérdidas de tiempo, corto circuito, mala operación, pero lo peor es ocasionar un accidente.

Con el paso del tiempo se han realizado diferentes métodos para arrancar un motor: arrancador a tensión plena, por resistencias, delta-estrella, arrancador suave, variador de velocidad. Todo esto para hacer el proceso más eficiente, ya que se trata de evitar altos consumos de corriente, daños en la parte mecánica, o variación de la velocidad de motor durante el proceso, por lo que el método de arranque va a depender de la aplicación y del presupuesto.

Por lo que la presente tesis toca los puntos más importantes y de una forma sencilla para el arranque y protección de motores eléctricos.

Objetivos

Refrendar los conocimientos básicos de electricidad para realizar los cálculos necesarios de los diferentes componentes para conectar un motor.

Conocer la construcción de un motor eléctrico y cuál es su principio de funcionamiento, y sobre todo saber leer la placa de datos, ya que esto es muy importante al momento de seleccionar el método de arranque y la forma de conectarlo.

Conocer las protecciones básicas con las que tiene que contar un arrancador para motor de acuerdo a la aplicación.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

Conocer las características y limitantes de los arrancadores electromecánicos y de estado sólido, para poder determinar cuál es el más eficiente de acuerdo a la aplicación.

Indice

| | |
|---|-----------|
| Agradecimientos..... | i |
| Introducción | iii |
| Objetivos | iv |
| 1.- Conceptos básicos de electricidad | 1 |
| 1.1 ¿QUÉ ES LA ELECTRICIDAD?..... | 1 |
| 1.2 VOLTAJE | 2 |
| 1.3 CORRIENTE | 3 |
| 1.4 RESISTENCIA..... | 4 |
| 1.5 LEY DE OHM | 5 |
| 1.6 CIRCUITOS BASICOS | 7 |
| Capitulo 2. Motores eléctricos | 1 |
| 2.1 Tipos de motores | 1 |
| 2.2 Conceptos Básicos..... | 1 |
| 2.3 Circuitos de corriente alterna..... | 4 |
| 2.4 Sistemas de corriente alterna monofásica | 7 |
| 2.5 Sistemas de corriente alterna trifásica | 9 |
| 2.6 Motor de inducción trifásico | 11 |
| 2.7 Características de medición..... | 20 |
| Capítulo 3.- Protección de motores | 1 |
| 3.1 Introducción..... | 1 |
| 3.2 Requisitos de protección del motor | 2 |
| 3.3 Medidas de protección..... | 11 |
| Capitulo 4. Métodos de arranque | 1 |
| 4.1 Arrancadores de control mecánico..... | 1 |
| 4.1.1 Arranque de motor directo | 1 |
| 4.1.2 Arranque estrella delta..... | 2 |
| 4.1.3 Arranque con autotransformador | 4 |
| 4.2 Arrancadores de Estado Solido..... | 6 |
| 4.2.1 Arrancador suave | 6 |

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

| | |
|--|----|
| 4.2.2 Variador de Velocidad | 16 |
| 5. Conclusiones | 1 |
| 6. Bibliografía | 1 |

1.- Conceptos básicos de electricidad

1.1 ¿QUÉ ES LA ELECTRICIDAD?

La electricidad puede ser bastante difícil de entender, ya que no es visible a simple vista.

Entendemos, sin embargo, para qué se usa la electricidad en nuestra vida diaria: encender la luz de la casa, energizar una aspiradora, o encender un equipo de aire acondicionado.

Para entender la electricidad, primero es necesario examinar la materia y la estructura básica de todos los materiales. Cuando nosotros estudiamos electricidad, estamos trabajando al “nivel molecular” de la materia. Existen millones de materiales complejos, tales como acero, aluminio, vidrio y plástico, pero todos estos materiales son una combinación de los elementos básicos. Carbono, hidrógeno y oxígeno son ejemplos de los 107 elementos conocidos, que conforman los materiales con los que trabajamos cada día.

Si el agua es dividida en gotas cada vez más pequeñas lo que a va a quedar se llama **molécula** y esta va a estar conformada por los elementos de hidrógeno y oxígeno.

Una simple molécula de agua está compuesta de dos elementos de hidrógeno y uno de oxígeno, designada como Molécula H₂O. Figura 1-1.



Fig. 1.1 Molécula del agua

Hemos descompuesto el agua en su más pequeña dimensión, a la cual llamamos molécula. Y ahora, descomponemos la molécula en los elementos básicos que conforman el agua hidrógeno y oxígeno. Ahora vayamos un paso adelante, para entender los componentes de un elemento.

Los elementos están hechos de minúsculas partículas llamadas **átomos**.

El núcleo del átomo está hecho de dos tipos de partículas, el **protón** y el **neutrón**. El protón tiene una carga eléctrica, mientras que el neutrón no.

Circulando alrededor del núcleo del átomo hay partículas llamadas **electrones**, que tienen una carga eléctrica opuesta a la del protón. La carga del electrón es considerada negativa, mientras que la del protón es considerada positiva. Figura 1-2.

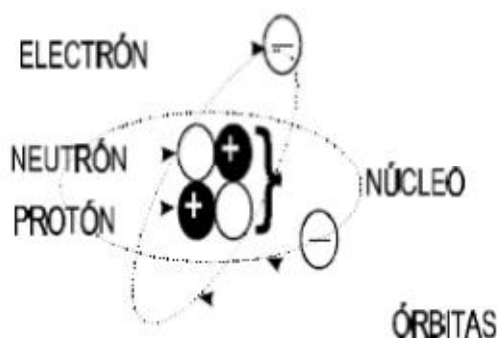


Fig. 1-2: Átomo

La *cantidad* de protones en el núcleo determina qué elemento es (por ejemplo: un átomo de cobre contiene 29 protones). El *arreglo* de electrones alrededor del núcleo determina la mayor parte de las

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

propiedades físicas y químicas, y el comportamiento del elemento. Los electrones del átomo son ordenados en capas, o envolturas alrededor del núcleo. El anillo más interior contiene no más de 2 electrones, la siguiente capa se limita a 8, la tercera puede tener hasta 18 y la cuarta hasta 32.

Ahora que hemos descompuesto la materia hasta el nivel atómico, veamos como este conocimiento nos ayuda a responder a la pregunta “¿qué es la electricidad?”. La electricidad resulta del movimiento de “electrones libres”, desde un átomo a otro en un material.

Mencionamos antes, que existen varias capas de electrones rotando alrededor del núcleo, estos se mantienen en órbita gracias a una cierta fuerza y mientras más cercanos estén del núcleo, mayor es la atracción. Los electrones que orbitan en las capas externas, se mantienen más bien “flojos” hacia el núcleo. Si dos moléculas llegan a estar lo suficientemente cerca, donde la distancia (d) entre un electrón y el Núcleo #1 es la misma que la distancia entre el electrón y el Núcleo #2, el electrón es considerado un “electrón libre”.

Un “electrón libre” es capaz de moverse desde un átomo hacia otro. Si se aplica una fuerza magnética externa, que cause que el electrón cargado negativamente se mueva hacia una carga positiva, el electrón se moverá de átomo en átomo. Cuando los electrones en un átomo se mueven de un átomo a otro, en un material, hemos generado electricidad. Algunos materiales tienen más electrones libres que otros. Figura 1.3

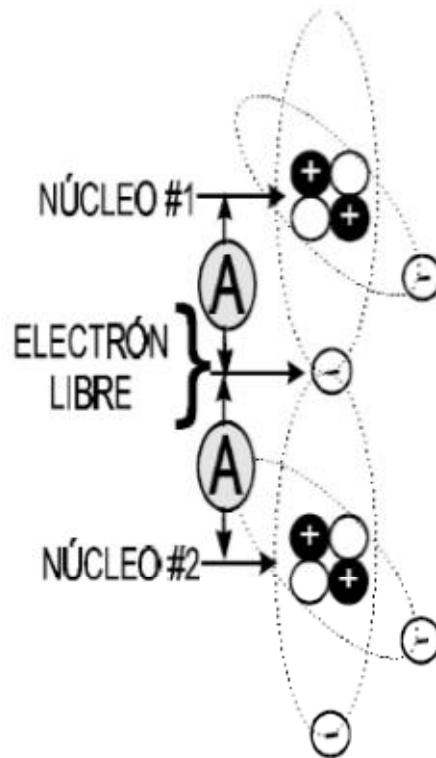


Fig. 1.3 Electrón libre

La **carga** de un electrón libre es la menor carga eléctrica posible y no importando su tamaño, son múltiplos de está. En un momento discutiremos cómo se mide la electricidad en términos de “flujo de electrones”.

1.2 VOLTAJE

A menudo es útil comparar el flujo de electrones a través de un cable con el flujo de agua a través de una cañería. En nuestra analogía, el agua representa a los electrones discutidos en la sección previa.

Capítulo 1: Conceptos básicos de electricidad

En nuestra ilustración se muestra un grifo de incendio, que representa una “fuente” de agua. Para nuestra ilustración, piensen en su tomacorriente normal como la **fuentes de energía**. Si abrimos el tapón sobre el grifo, el agua comienza a fluir a través de la manguera que hemos conectado. La velocidad del flujo a través de la manguera, depende de la cantidad de presión y del largo y ancho de la cañería. Un incremento en la presión y/o una manguera de mayor diámetro, permite que fluya una cantidad mayor de agua fuera del pitón. Figura 1.4



fig. 1.4 Grifo de agua

La presión en nuestro ejemplo del agua es creada por la misma torre. El gran tanque de agua está colocado en alto sobre el terreno, lo cual dada la fuerza de gravedad, crea una cierta cantidad de presión de agua en la base de la torre la cual depende de la altura.

Similarmente, la cantidad de electricidad que fluye a través del cordón enchufado al tomacorriente, depende de la presión eléctrica (voltaje) y las características y largo del cable. La presión eléctrica disponible en el tomacorriente es creada por una presión externa sobre los electrones para moverse desde un punto a otro.

La unidad de medida de la presión eléctrica se llama **voltio**. Se le llamo así en honor a Alessandro Volta, un científico italiano que descubrió cómo hacer una batería.

El grifo de incendio en la figura 1-4, está conectado a la gran reserva de agua vía una red de cañerías subterráneas la cual proporciona una fuente continua de agua al grifo.

Similarmente, debe existir una continua generación de electrones disponibles en la fuente o nuestros dispositivos no funcionarán. Seguramente todos hemos experimentado una interrupción del servicio eléctrico, cuando la disponibilidad de electricidad para nuestras casas ha sido cortada.

La generación de electricidad y el voltaje apropiado es provista y monitoreada por la compañía de electricidad, a través de una red de generadores, líneas de transmisión y transformadores.

1.3 CORRIENTE

En nuestra analogía del agua, somos capaces de determinar la velocidad del flujo de agua a través de la manguera, midiendo cuánta agua, en galones, fluye fuera del grifo sobre un período de tiempo específico. La cantidad de agua que fluye está determinada por la de presión del agua y el diámetro de la manguera. Por ejemplo, una manguera de incendio puede proveer agua a una velocidad de 40 litros por segundo, mientras que una manguera de jardín podría llenar un balde a solo 0.25 litros por segundo. Figura 1.5.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado solido .



Fig. 1.5 Presión del agua

Similarmente podemos medir la velocidad de los electrones fluyendo a través de un alambre, ya que anteriormente sostuvimos que la electricidad es el movimiento de estos dentro de la materia y que poseen una carga negativa. Una unidad de carga se conoce como **Coulomb** y toma 624×10^{16} electrones componerlo y es una unidad práctica, usada para indicar la cantidad de electricidad que fluye a través de un circuito.

Cuando trabajamos con electricidad, la carga misma no es el factor que determina el comportamiento de un circuito y esta debe fluir en un período de tiempo. El flujo efectivo de electrones, desde el negativo al positivo a través de un material es referido como **corriente**.

La corriente es medida en términos del número de electrones pasando por un solo punto en un segundo y se mide en coulombs y es llamada un **amperio** (amp) y ésta es la unidad normal de la corriente eléctrica. El amperio o ampere es llamado así por Andre Ampere, un físico francés que investigó el efecto de las fuerzas magnéticas en las corrientes. La corriente, al contrario de la carga, es el factor práctico que se usa cuando se seleccionan componentes en un circuito. Figura 1.6

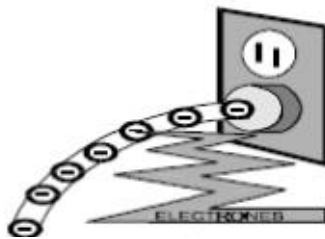


Fig.1.6 flujo de electrones

El flujo de electrones es igual a la corriente, y los electrones por segundo es igual a los amperes

1.4 RESISTENCIA

Hemos mencionado la resistencia muchas veces en nuestra analogía del agua, pero no hemos explicado realmente cómo ésta funciona ya que sostuvimos que la cantidad que fluye desde el grifo, depende de la cantidad de presión. El otro factor que determina el flujo es la resistencia y puede ser representada en la forma de una manguera de diámetro más pequeño, o por las características de la misma. La cantidad de agua que puede fluir en una manguera, depende del área de la sección transversal de la manguera. Mientras mayor sea el diámetro, menor será la resistencia y mayor cantidad de fluido. Figura 1.7

Capítulo 1: Conceptos básicos de electricidad



Fig. 1.7

La **resistencia** es por tanto la fricción interna involucrada en el paso del agua a través de la manguera. En el ejemplo, mientras menor sea el diámetro, menor será la cantidad de agua que fluirá a través de ella y a la inversa mientras mayor sea el diámetro, mayor será la cantidad de agua que fluirá a través de ella. El ancho es una forma de resistencia que restringe el flujo de agua.

Similarmente los electrones que fluyen a través del cable conductor, pueden ser restringidos por el diámetro y características del cable.

Los electrones que se mueven desde una molécula a la siguiente en un material conductor, están realmente fluyendo sobre la superficie del material. El corte transversal de un alambre, ilustra que los electrones están ubicados sobre la periferia del alambre y la cantidad que fluye depende del perímetro del círculo. Por lo tanto, mientras mayor sea el tamaño del alambre, mayor será el área de la superficie y menor la resistencia. Figura 1.8

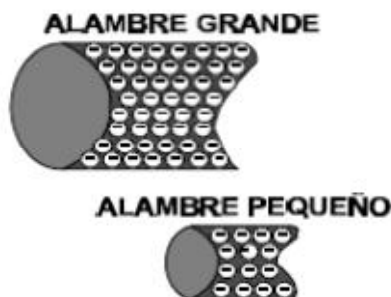


Fig. 1.8 fluido de electrones

La unidad de medida de la resistencia en un circuito eléctrico es llamada **ohms**, en honor al científico alemán G. S. Ohm, que descubrió que la corriente en un alambre es proporcional al voltaje.

La resistencia es una característica importante, ya que ayuda a determinar cuánta corriente fluirá a través del circuito. Los componentes de un equipo eléctrico pueden ser diseñados con muchas resistencias diferentes. Por ejemplo, una lámpara común de 100 volts tiene una resistencia de alrededor de 144 ohms, mientras que una lámpara de 10 volts tiene una resistencia de alrededor de 1440 ohms. Un calefactor eléctrico de 1200 volts, tiene una resistencia de aproximadamente 9.6 ohms, mientras que una rasuradora eléctrica de 2 volts tiene una resistencia de alrededor de 7200 ohms. En los circuitos eléctricos, los resistores pueden variar desde un mínimo de 1/10 ohms, hasta un máximo de varios millones de ohms.

1.5 LEY DE OHM

Hemos discutido cómo la electricidad es el resultado de los electrones moviéndose a través de un material y que el movimiento es causado por una forma de presión (voltaje) en la fuente de poder.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

También hemos examinado el flujo de electrones en el tiempo y entendido que esta corriente eléctrica es medida en amperios. Y finalmente, entendemos que la cantidad de resistencia, medida en Ohms, impacta a la cantidad de corriente que puede fluir a través de un circuito. Ahora veamos la relación entre las tres variables que hemos presentado: Voltaje, Corriente y Resistencia.

Hemos mostrado que la velocidad de flujo del agua (galones o litros por segundo) a través de una manguera, depende de la fuerza o presión sobre el agua y del tamaño y resistencia de la manguera, por lo tanto cuando la presión aumenta, el flujo aumenta y una mayor resistencia (una manguera más pequeña), causa un menor flujo.

Existe una relación similar entre corriente, voltaje y resistencia. Un volt impulsará un amperio de corriente a través de un ohmio de resistencia cuando la presión eléctrica (voltaje) aplicada en un circuito aumenta, el flujo de electrones (corriente) aumenta. Cuando la resistencia aumenta sin que cambie la presión eléctrica, la corriente disminuye. Figura 1.9

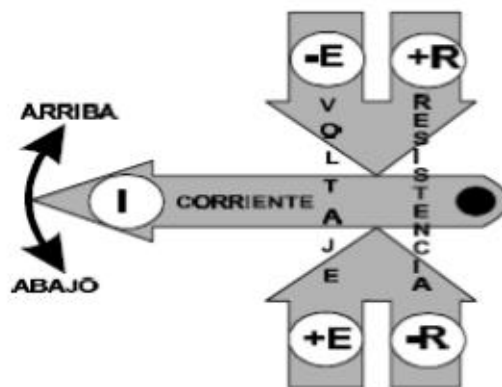


Fig. 1.9

Estos factores pueden ser combinados en un solo enunciado y escrito como una fórmula que explique la relación entre corriente, voltaje y resistencia.

$$\text{Amperio de corriente} = \frac{\text{Presión eléctrica en voltios}}{\text{Resistencia en ohmios}}$$

Esta fórmula es llamada **Ley de Ohm** y es usualmente expresada de la siguiente forma:

$$I = E/R \text{ o } E = IR$$

E representa la presión eléctrica medida en voltios.

I representa la intensidad de corriente en amperios.

R representa la resistencia, medida en ohmios.

La fórmula para la Ley de Ohm puede también ser mostrada en un círculo. Si dos partes cualquiera son conocidas, la tercera puede ser calculada fácilmente. La fórmula adecuada puede ser obtenida simplemente cubriendo la variable desconocida. Por ejemplo, si usted cubre la letra "E" con su mano, la fórmula para el voltaje es "IR" (corriente x resistencia). Si se desconoce la corriente, la fórmula se presenta como "E/R" (voltaje/ resistencia). Figura 1.10

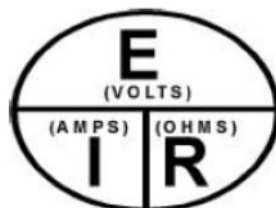


Fig. 1.10

Para ilustrar cómo se usa la Ley de Ohm, he aquí algunos ejemplos:

Capítulo 1: Conceptos básicos de electricidad

1. ¿Si una lámpara de 6-ohms de resistencia es conectada a una batería de 12-volts, cuál es la corriente en la figura 1.11?



Fig. 1.11 Cálculo de los amperes

Si usted observa el círculo, podrá ver que mientras los volts y los ohms son conocidos, los amperes son la resultante de la división de los volts entre los ohms:

$$I = E/R = 12/6 = 2 \text{ amps}$$

2. ¿Cuántos volts se necesitan para tener una corriente de 2 amperes en una lámpara de 6 ohms, figura 1.12?

Si usted verifica el círculo, podrá ver que mientras los amperes y ohms son conocidos, los volts son la resultante de la multiplicación de estos:

$$V = I \times R = 2 \times 6 = 12 \text{ volts}$$

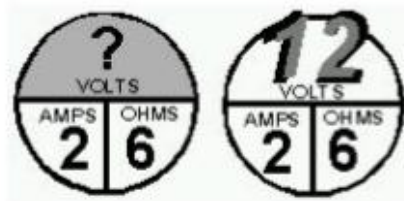


Fig. 1.12 Cálculo del voltaje

3. Encuentre la resistencia de una lámpara, que permita una corriente de 2 amperes al conectarla a una batería de 12 volts como en la figura 1.13.

De acuerdo con el círculo, la resistencia puede ser determinada dividiendo volts entre amperes:

$$R = V/A = 12/2 = 6 \text{ ohmios}$$

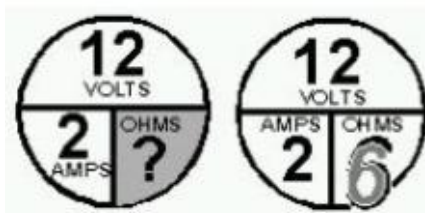


Fig. 1.13 Cálculo de la resistencia

1.6 CIRCUITOS BASICOS

Una carga eléctrica causa que los electrones fluyan desde un punto a otro negativo a positivo. Un circuito eléctrico describe el paso que los electrones están tomando en términos de alambres y equipos. En todos los **circuitos eléctricos**, la fuente de poder es mostrada como dos o más puntos para que la corriente parta y regrese.

El circuito básico de la figura 1.14, ilustra cómo una fuente eléctrica puede ser conectada a una lámpara para producir luz.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado solido .

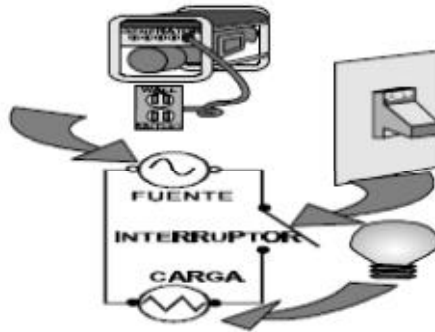


Fig. 1.14 conexión de lámpara

Los circuitos eléctricos pueden ser muy simples o muy complejos. En general, utilizamos diagramas de circuitos para ilustrar los variados componentes y distinguir las unidades de medición (volts, amperes y ohm) y estos indicaran: la fuente de voltaje, resistencia para cada componente conectado y la cantidad de corriente que fluye.

Los circuitos eléctricos pueden ser escritos en diversos formatos, dependiendo del propósito del diagrama y estos pueden ser creados para el propósito de dimensionamiento de los componentes, ubicación física, instrucciones de instalación, solución de fallas, o muchos otros propósitos.

Capitulo 1: Conceptos básicos de electricidad .

Capítulo 2. Motores eléctricos

El motor eléctrico es una máquina destinada a transformar energía eléctrica en energía mecánica. Es el más usado de todos los tipos de motores, ya que combina las ventajas de la utilización de la energía eléctrica –bajo costo, facilidad de transportar, limpieza y simplicidad de comando- con su construcción simple, costo reducido, gran versatilidad de adaptación a las cargas más diversas y mejores rendimientos.

2.1 Tipos de motores

- a) Motores de corriente continua: son motores de costo elevado y además precisan de una fuente de corriente continua o un dispositivo que convierta la corriente alterna común en continua. Pueden funcionar con velocidad ajustable entre amplios límites y se prestan a controles de gran flexibilidad y precisión. Por eso su uso es restringido a casos especiales en que estas exigencias compensan el costo mucho más alto de la instalación.
- b) Motores de corriente alterna: son los más utilizados, porque la distribución de la energía eléctrica es hecha normalmente en corriente alterna. Los principales tipos son:
 - a. Motor síncrono: funcionan a velocidad fija, utilizado solamente para grandes potencias (debido a su alto costo en tamaños pequeños) o cuando se necesita velocidad invariable.
 - b. Motor de inducción: funciona normalmente con una velocidad constante, que varía ligeramente con la carga mecánica aplicada al eje. Debido a su gran simplicidad, robustez y bajo costo, es el motor más utilizado, siendo adecuado para casi todos los tipos de máquinas que se encuentran en la práctica.

2.2 Conceptos Básicos

Par

El par también llamado momento binario o torque: es la medida de la fuerza necesaria para girar un eje.

Es sabido por la experiencia práctica que para levantar un peso mediante un proceso semejante al usado en pozos de agua la fuerza F que es preciso aplicar a la manivela depende del largo l de la misma. Cuanto más larga sea la manivela, menor será la fuerza necesaria. Si aumentas el tamaño l de la manivela al doble, la fuerza F necesaria disminuye a la mitad.

En el ejemplo si el balde pesa 20N y el diámetro del tambor es de 0.20 m, la cuerda transmitirá una fuerza de 20 N en la superficie del tambor, o sea a 0.10 m del eje del tambor. Para contrarrestar esta fuerza se precisan 10 N en la manivela si el largo l fuera 0.20 m. Si l fuera el doble, o sea de 0.40 m, la fuerza F sería la mitad, o sea 5N.

Como vemos, para medir la “fuerza” necesaria para hacer girar el eje no basta definir la fuerza empleada: es preciso decir también a que distancia del eje es aplicada la fuerza. La “fuerza” es medida por el par que es el producto de la fuerza por la distancia, $F \times l$.

En el ejemplo citado, el par es:

$$C = 20N \times 0.10m = 10N \times 0.20m = 5N \times 0.40m = 2.0 \text{ Nm}$$

Las unidades utilizadas aquí son las del Sistema Internacional “SI”.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

$$C = \mathcal{F} \times l$$

Energía y potencia mecánica

La potencia mide la rapidez con la que la energía es aplicada o consumida. En el ejemplo anterior, si el pozo mide 24.5 metros de profundidad, la energía gastada o el trabajo realizado para subir el balde del fondo hasta la boca del pozo es siempre la misma valiendo $20\text{N} \times 24.5\text{m} = 490 \text{ Nm}$, note que la unidad de energía medida de energía mecánica **Nm**, es la misma que usamos para el par, pero se trata de variables de naturaleza diferente que no deben ser confundidas.

$$W = \mathcal{F} \times d \text{ (Nm)}$$

$$1 \text{ Nm} = 1 \text{ J} = W \cdot \Delta t$$

La potencia indica la rapidez con que esta energía es aplicada y se calcula dividiendo la energía o trabajo total por el tiempo utilizado en realizarlo. Así si ocupamos un motor eléctrico capaz de subir el balde de agua en 2.0 segundos, la potencia necesaria sería:

$$P1 = 490 / 2.0 = 245 \text{ W}$$

Si usáramos un motor más potente, con capacidad de realizar el trabajo en 1.3 segundos entonces la potencia sería:

$$P2 = 490 / 1.3 = 377 \text{ W}$$

La unidad más usual para la medida de la potencia mecánica es el **hp** (caballo de vapor o fuerza), equivalente a **736 W**. Entonces las potencias de los motores mencionados serían:

$$P1 = 245 / 736 = 1/3 \text{ hp}$$

$$P2 = 377 / 736 = 1/2 \text{ hp}$$

$$P_{\text{mec}} = \frac{F \cdot d}{t} \quad (\text{W})$$

Entonces:

$$1 \text{ hp} = 736 \text{ W}$$

Y por consecuencia:

$$P_{\text{mec}} = \frac{F \cdot d}{736 \cdot t} \quad (\text{hp})$$

Para movimientos circulares

$$C = \mathcal{F} \cdot R \quad (\text{N.m})$$

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} \quad (\text{m/s})$$

$$P_{\text{mec}} = \frac{F \cdot v}{736} \quad (\text{hp})$$

Capitulo 2: Motores eléctricos

Donde

C = par en Nm

f = fuerza en N

l = brazo de la palanca en m

r = radio de la polea en m

v = velocidad angular en m/s

d = diámetro de la pieza en m

n = velocidad en rpm

Energía y potencia eléctrica

A pesar de que la energía eléctrica es una sola cosa, puede ser presentada en formas diferentes. Si conectamos una resistencia a una red eléctrica con tensión, pasara una corriente eléctrica que terminara calentándola. Esta absorbe energía y la transforma en calor. Un motor eléctrico absorbe energía eléctrica de la red y la transforma en energía mecánica disponible en la punta del eje.

Circuitos de corriente continua.

La potencia eléctrica en circuitos de corriente continua puede ser obtenida a través de la relación entre la tensión (V), la corriente (I) y resistencia (R) del circuito, o sea:

$$P = V \cdot I \quad (W)$$

O

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (W)$$

O

$$P = RI^2$$

Donde

V = tensión en volts

I = corriente en amperes

R = resistencia en ohm

P = potencia en watts

2.3 Circuitos de corriente alterna

a) resistencia

En el caso de resistencias cuanto mayor sea la tensión de la red, mayor será la corriente y más rápido se calentará la resistencia. Esto quiere decir que la potencia eléctrica será mayor. La potencia eléctrica absorbida por la red, en el caso de la resistencia, es calculada multiplicando la tensión de la red por la corriente, si la resistencia "carga" fuera monofásica.

$$P = V \cdot I \quad (W)$$

En el sistema trifásico la potencia de cada fase de carga será

$$P_t = V_t \cdot I_t$$

Como si fuese un sistema monofásico independiente. La potencia total será la suma de las potencias de las tres fases, o sea:

$$P = 3P_t = 3 \times V_t \cdot I_t$$

Recordando que el sistema trifásico puede ser conectado en estrella o triángulo, tenemos las siguientes relaciones:

Conexión estrella

$$U = \sqrt{3V_t}$$

y

$$I = I_t$$

Conexión triángulo

$$V = V_t$$

Y la corriente

$$I = \sqrt{3I_t}$$

Así la potencia total para ambas conexiones será:

$$P = \sqrt{3} VI \quad (w)$$

Esta expresión vale para la carga formada por resistencias, donde no hay desfase de corriente

b) Cargas reactivas

Para las cargas reactivas, o sea donde existe desfase, como es el caso de los motores de inducción, este desfase tiene que ser tenido en cuenta y la expresión es:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi \quad (W)$$

Capítulo 2: Motores eléctricos

La unidad de medida para la potencia eléctrica es el **watt (W)**, correspondiente a 1 volt x 1 ampere o su múltiplo, el kilowatt = 1000 watts. Esta unidad también es usada para medir la potencia mecánica.

La unidad de medida para la energía eléctrica es el **kilowatt hora (kWh)**, correspondiente a la energía suministrada por una potencia de 1 kW funcionando durante una hora; es la unidad que aparece en las cuentas de la luz para la cobranza.

Potencia aparente, activa y reactiva

Potencia aparente (S)

Es el resultado de multiplicar la tensión por la corriente:

$$S = V \times I \text{ para sistemas monofásicos}$$

Y

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \text{ para sistemas trifásicos}$$

Corresponde a la potencia real o potencia activa que existiría si no hubiera desfase de la corriente o sea, si la carga fuese formada por resistencias. Entonces:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} \quad (\text{VA})$$

Evidentemente para las cargas resistivas $\cos \varphi = 1$ y la potencia activa queda igual a la potencia aparente.

La unidad de medida para la potencia aparente es el **volt ampere (VA)**

Potencia Activa (P)

Es la porción de la potencia aparente que realiza trabajo, o sea que es transformada en energía

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi \quad (\text{W})$$

O

$$P = S \times \cos \varphi \quad (\text{W})$$

Potencia reactiva (Q)

Es la porción de potencia aparente que no realiza trabajo. Apenas es transferida o almacenada en los elementos reactivos (capacitores e inductancias) del circuito

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \varphi \quad (\text{Var})$$

O

$$Q = S \times \sin \varphi \quad (\text{Var})$$

Triangulo de potencias. Figura 2.1

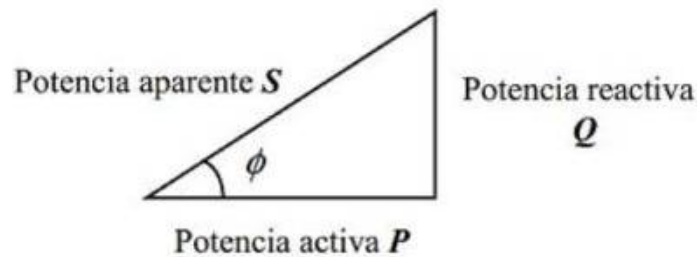


Fig. 2.1 Representación triangulo de potencias

Factor de potencia

El factor de potencia indicado por $\cos \varphi$, donde φ es el ángulo de desfase de la tensión en relación de la corriente, es la relación entre la **potencia real (activa) P** y la **aparente S**

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P(KW) \times 1000}{\sqrt{3} \times V \times I}$$

Así

Carga resistiva: $\cos \varphi = 1$

Carga inductiva: $\cos \varphi =$ atrasado

Carga capacitiva: $\cos \varphi =$ adelantado

Los términos atrasado y adelantado se refieren a la fase de la corriente en relación a la de tensión.

Rendimiento

El motor eléctrico absorbe energía eléctrica de la línea y transforma en energía mecánica disponible en el eje. El rendimiento define la eficiencia con que se realiza esta transformación.

Llamando "**potencia útil**" P_u a la potencia mecánica disponible en el eje y "**potencia absorbida**" P_a a la potencia eléctrica que el motor saca de la red, el rendimiento será la relación entre ambas, o sea

$$\eta = \frac{P_u (W)}{P_a (W)} = \frac{736 \times P (cv)}{\sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi} = \frac{1000 \times P (kw)}{\sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi}$$

o

$$\eta \% = \frac{736 \times P (cv)}{\sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi} \times 100$$

Relación entre unidades de potencia.

Recordando que

$$P (kW) = 0.736 P (hp)$$

O

Capitulo 2: Motores eléctricos

$$P(\text{hp}) = 1.359 \text{ (kW)}$$

Relación entre par y potencia

Cuando la energía eléctrica es aplicada bajo la forma de movimiento rotativo, la potencia desarrollada depende del par C y de la velocidad de rotación n . Las relaciones son:

$$P(\text{hp}) = \frac{C(\text{kgfm})n(\text{rpm})}{716} = \frac{C(\text{Nm})n(\text{rpm})}{7024}$$

$$P(\text{kW}) = \frac{C(\text{kgfm})n(\text{rpm})}{974} = \frac{C(\text{Nm})n(\text{rpm})}{9555}$$

Inversamente

$$C(\text{kgfm}) = \frac{716 \times P(\text{cv})}{n(\text{rpm})} = \frac{974 \times P(\text{kW})}{n(\text{rpm})}$$

$$C(\text{Nm}) = \frac{7024 \times P(\text{cv})}{n(\text{rpm})} = \frac{9555 \times P(\text{kW})}{n(\text{rpm})}$$

2.4 Sistemas de corriente alterna monofásica

Generalidades

La corriente alterna se caracteriza por el hecho de que la tensión (voltaje) en vez de permanecer fija como entre los polos de una batería, varía con el tiempo, cambiando de sentido alternadamente. En el sistema monofásico, una tensión alterna V (volt) es generada y aplicada entre dos cables, a los que se conecta la carga, que absorbe una corriente I (ampers). Figura 2.2

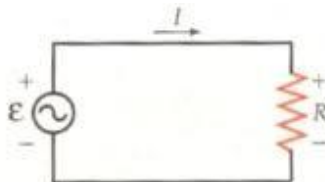


Fig. 2.2 Circuito corriente alterna

Si representamos en un gráfico los valores de V e I para cada instante, vamos a obtener la figura 2.3. En esta también están indicados algunos parámetros que serán definidos a continuación. Note que las ondas de tensión y de corriente no están en fase, o sea no pasan por el valor cero al mismo tiempo aunque tengan la misma frecuencia; Esto sucede para muchos tipos de carga, por ejemplo, bobinados de motores (cargas reactivas)

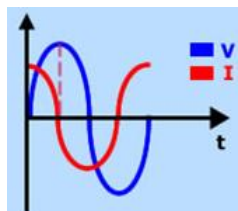


Fig. 2.3

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

Frecuencia

Es el número de veces por segundo que la tensión cambia de sentido y vuelve a la condición inicial. Se expresa en ciclos por segundo o Hertz y se simboliza "Hz".

Tensión máxima (Vmax)

Es el valor pico de tensión, o sea, el mayor valor instantáneo alcanzado por la tensión durante un ciclo, este valor es alcanzado dos veces por ciclo, una vez en positivo y otro en negativo).

Corriente máxima (Imax)

Es el valor pico de corriente

Valor eficaz de tensión y corriente (V y I)

Es el valor de tensión y corriente continuas que desarrollan una potencia correspondiente a aquella desarrollada por la corriente alterna. Se puede demostrar que el valor eficaz vale:

$$V = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$$

Y la corriente

$$I = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

Por ejemplo: si conectamos una resistencia a un circuito de corriente alterna ($\cos \varphi = 1$) con $V_{max} = 311$ volts e $I_{max} = 14.14$ amp, la potencia desarrollada será:

$$P = V \times I \times \cos \varphi = 0.5 V_{max} \times I_{max} \times \cos \varphi$$

$$P = 2200 \text{ W}$$

Cuando se habla de tensión y corriente sin especificar nada más, por ejemplo 220 volts o 10 amperes, nos estamos refiriendo a los valores eficaces de la tensión o corriente, que son los empleados en la práctica.

Desfase (φ)

Es el atraso de la onda de corriente en relación a la onda de tensión (ver fig. 2.3). En vez de ser medido en tiempo (segundos), este atraso es medido en grados correspondiente a la fracción de un ciclo completo, considerando 1 ciclo = 360° . Aún más común es expresarlo por el coseno de ese Angulo.

Conexiones en serie y paralelo

La conexión de dos cargas iguales a un sistema monofásico puede ser efectuada de dos modos

Conexión en serie en la que las dos cargas son atravesadas por la corriente total del circuito. En este caso la tensión en cada carga será la mitad de la tensión del circuito para cargas iguales.

Capítulo 2: Motores eléctricos

Conexión en paralelo, en la que se aplica a las dos cargas la tensión de circuito. En este caso, la corriente en cada carga será la mitad de corriente total del circuito para cargas iguales.

2.5 Sistemas de corriente alterna trifásica

El sistema trifásico es formado por la asociación de tres sistemas monofásicos de tensiones V_1 , V_2 y V_3 tal que el desfase entre los tres sea de 120° , o sea, los atrasos de V_2 en relación a V_1 y de V_1 en relación a V_3 sean igual a 120° (considerando un ciclo completo = 360°). El sistema es equilibrado si las tres tensiones tienen el mismo valor eficaz $V_1 = V_2 = V_3$, según la figura 2.4

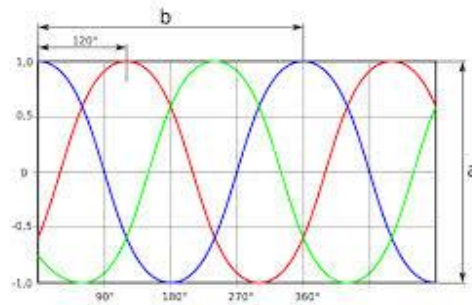


Fig. 2.4 sistema trifásico equilibrado en voltaje

Conectando entre sí los tres sistemas monofásicos y eliminando los cables innecesarios, tendremos un sistema trifásico: tres tensiones V_1 , V_2 y V_3 equilibradas, desfasadas 120° entre sí y aplicadas entre los tres cables del sistema. La conexión puede ser efectuada de dos formas, representadas en los esquemas siguientes. En estos esquemas se acostumbra representar las tensiones con flechas inclinadas o vectores giratorios, manteniendo entre sí el ángulo correspondiente al desfase (120°).

Conexión delta

Si conectamos los tres sistemas monofásicos entre sí, como indica la figura 2.6 podremos eliminar tres cables, dejando solo uno en cada punto de conexión, y el sistema trifásico quedara reducido a tres cables L_1 , L_2 y L_3 . Figura 2.5

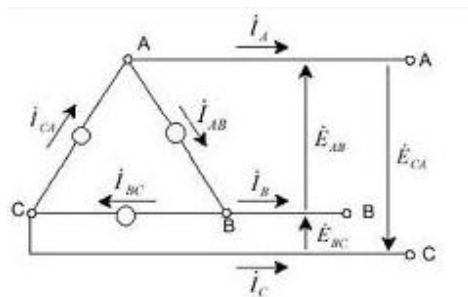


fig. 2.5 conexión delta

Tensión de línea (V)

Es la tensión nominal del sistema trifásico aplicada entre dos cables cualesquiera de los tres cables L_1 , L_2 y L_3 .

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado solido .

Corriente de línea (I)

Es la corriente en cualquiera de los tres cables L1, L2 y L3.

Tensión y corriente de fase (Vf e If)

Son tensión y corriente de cada uno de los sistemas monofásicos considerados.

Observando la figura 2.5, se ve que:

$$V = V_f$$

$$I = (\sqrt{3} \times I_f) / 3$$

$$I = I_{f1} + I_{f3} \text{ (fig. 2.5)}$$

Ejemplo: tenemos un sistema trifásico equilibrado con tensión nominal de 220 Vca. La corriente medida es de 10 amperes. Conectando a este sistema una carga trifásica compuesta por tres cargas iguales en delta, ¿cual es la tensión y la corriente en cada una de las cargas?

Tenemos $V_f = V_L = 220$ Vca en cada una de las cargas

Si $I = 1.732 \times I_f$ tenemos:

$I_f = 0.577 \times I = 5.77$ amp en cada una de las cargas.

Conexión estrella

Conectando uno de los cables de cada sistema monofásico a un punto común y los tres cables restantes forman un sistema trifásico en estrella. Figura 2.6

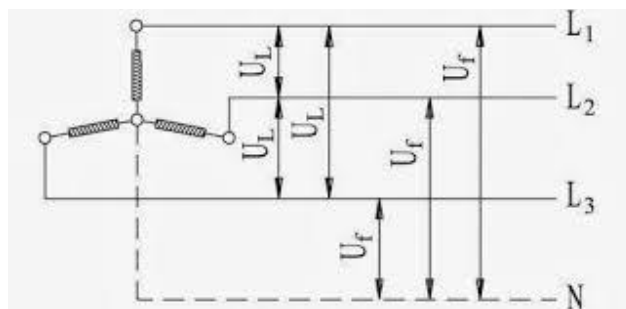


Fig. 2.6 Conexión estrella

A veces, el sistema trifásico en estrella es a cuatro cables o con neutro. El cuarto cable es conectado al punto común a las tres fases. La tensión de línea o tensión normal del sistema trifásico y la corriente de línea son definidas del mismo modo que en la conexión triángulo.

Examinando el esquema de la figura 2.6, se ve que:

$$I = I_f$$

$$V = \sqrt{3} \times V_f = 1.732 \times V_f$$

$$V = V_{f1} + V_{f2} \text{ (figura 2.6)}$$

Capítulo 2: Motores eléctricos

Ejemplo: tenemos una carga trifásica compuesta de tres cargas iguales y cada carga está hecha para ser conectada a una tensión de 220 Vca, absorbiendo 5.77 amperes.

¿Cuál es la tensión normal del sistema trifásico que alimenta esta carga en sus condiciones normales 220 vca y 5.77 amp? y ¿Cuál es la corriente de línea?

Tenemos $V_f = 220$ Vca normal de cada carga

$$V = 1.732 \times 220 = 380 \text{ vca}$$

$$I = I_f = 5.77 \text{ amp}$$

2.6 Motor de inducción trifásico

El motor de inducción trifásico está compuesto fundamentalmente por dos partes: estator y rotor .figura 2.7

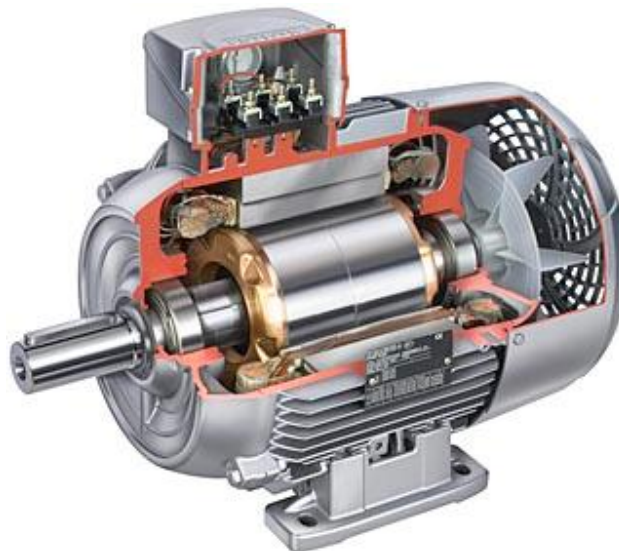


Fig. 2.7 motor de inducción trifásico

Estator

- Carcaza: es la estructura soporte del conjunto de construcción robusta en hierro fundido, acero o aluminio inyectado, resistente a la corrosión y presenta aletas.
- Núcleo de chapas: son de acero magnético, tratadas térmicamente para reducir al mínimo las pérdidas de hierro.
- Bobinado trifásico: tres conjuntos iguales de bobinas, una para cada fase, formando un sistema trifásico conectado a la red de distribución.

Rotor

- Eje transmite la potencia mecánica desarrollada por el motor. Es tratado térmicamente para evitar problemas como deformación o fatiga.
- Núcleo de chapas las chapas poseen las mismas características que las del estator
- Barras y anillos de corto circuito son de aluminio, fundidas a presión en una única pieza

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

Otras partes del motor de inducción trifásico son

- Tapas
- Ventilador
- Protección del ventilador
- Caja de conexiones
- Placa de bornes
- Rodamientos

Lo que caracteriza al motor de inducción es que solo el estator es conectado a la red de alimentación. El rotor no es alimentado externamente y las corrientes que circulan en él, son inducidas electromagnéticamente por el estator, de donde surge el nombre de motor de inducción.

Principio de funcionamiento (campo giratorio): Cuando una bobina es recorrida por una corriente eléctrica, se genera un campo magnético dirigido en dirección del eje de la bobina y de valor proporcional de la corriente. Figura 2.8

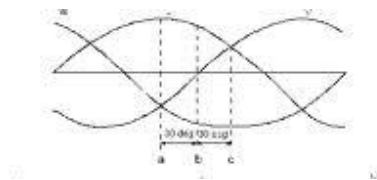


Fig. 2.8 principio de funcionamiento

- a) En la figura 2.9 se muestra un bobinado monofásico recorrido por una corriente I y un campo H es generado por ella; el bobinado está constituido por un par de polos, un polo norte y un polo sur, cuyos efectos se suman para establecer el campo H . el flujo magnético atraviesa el rotor entre los dos polos y se cierra a través del núcleo del estator. Si la corriente I es alterna, el campo H también, y su valor a cada instante podrá ser representado por el mismo gráfico, también invirtiendo el sentido a cada medio ciclo. El campo H es pulsante pues su intensidad varía proporcionalmente a la corriente, siempre en la misma dirección norte-sur

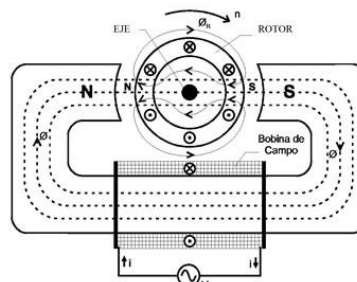
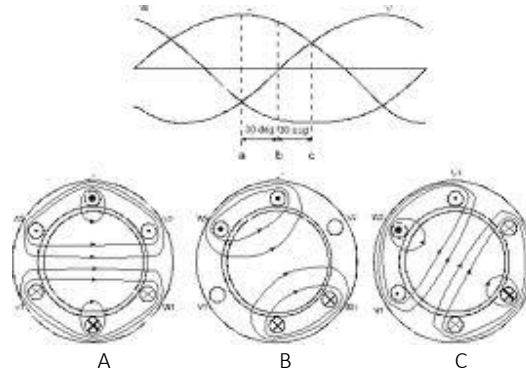


Fig. 2.9 bobinado monofásico

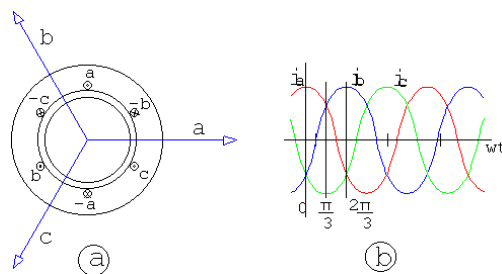
- b) En la fig. 2.10 se muestra un bobinado trifásico, conformado por tres monofásicos espaciados entre sí 120° . Si este bobinado fuera alimentado por un sistema trifásico, las corrientes I_1 , I_2 y I_3 crearán, del mismo modo, sus propios campos magnético H_1 , H_2 y H_3 . Estos campos están espaciados entre sí 120° . Además, como son proporcionales a las respectivas corrientes, estarán

Capítulo 2: Motores eléctricos

desfasadas en el tiempo 120° entre sí, y pueden ser representados por un gráfico igual al de la figura 1.5. el campo total H resultante en cada instante, será igual a la suma grafica de los tres campos H_1 , H_2 y H_3 del instante correspondiente. En la fig. 2.10 representamos esta suma grafica para seis instantes sucesivos



En el instante (A), la figura 2.10 A, muestra que el campo H , es máximo y los campos H_2 y H_3 son negativos y del mismo valor, iguales a $0.5 H_1$. Los tres campos son representados en la fig. 2.11, parte superior y teniendo en cuenta que el campo negativo se representa con un vector (flecha) en sentido opuesto al que sería el normal; el campo resultante (suma grafica) es representado en la parte inferior de la fig. 2.11 y tiene la misma dirección que la fase 1.



Repitiendo la construcción para los puntos A, B, y C de la fig. 2.10 se observa que los campos resultantes H tienen intensidad constante, pero su dirección gira, completando una vuelta cada fin de ciclo.

Así, cuando el bobinado trifásico es alimentado por corrientes trifásicas, se genera un campo giratorio, como si hubiese un único par de polos giratorios de intensidad constante. Este campo giratorio, creado por el bobinado trifásico del estator, induce tensiones en las barras del rotor, las líneas de flujo cortan las barras del rotor, las cuales generan corrientes, y por consecuencia, un campo en el rotor de polaridad opuesta a la del campo giratorio. Como los polos opuestos se atraen y como el campo del estator es rotativo, tiende a acompañar la rotación de este campo. Entonces, en el rotor se genera un par motor que hace que gire, moviendo la carga.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

Velocidad de sincronía (ns)

La velocidad síncrona del motor es definida por la velocidad de rotación del campo giratorio, lo cual depende de la cantidad de polos (p) del motor y de la frecuencia (f) de la red, en Hertz.

Los bobinados pueden ser contruidos con uno o más pares de polos, que se distribuyen alternadamente un norte y un sur, a lo largo de la periferia del núcleo magnético. El campo magnético recorre un par de polos **p** en cada ciclo. Así, como el bobinado tiene polos o pares de polos, la velocidad del campo será:

$$n_s = \frac{60 \times f}{p} = \frac{120 \times f}{2p} \text{ (rpm)}$$

Ejemplos:

- a) ¿Cuál es la rotación síncrona de un motor de 6 polos, 60 hz ?

$$n_s = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$$

- b) ¿Cuál es la rotación de un motor de un motor de 12 polos, 50 hz?

$$n_s = \frac{120 \times 50}{12} = 500 \text{ rpm}$$

nota: que la cantidad de polos del motor tendrá que ser siempre par, para formar los pares de polos.

Para las frecuencias y polaridades usuales, la velocidad de sincronía es:

Velocidad de sincronía

| No de polos | velocidad de sincronía (vueltas por minuto) | |
|-------------|---|----------|
| | 60 Hertz | 50 Hertz |
| 2 | 3600 | 3000 |
| 4 | 1800 | 1500 |
| 6 | 1200 | 1000 |
| 8 | 900 | 750 |

Tabla 1 Velocidad de sincronía

Para motores de dos polos, el campo recorre una vuelta en cada ciclo. Así, los grados eléctricos equivalen a los grados mecánicos.

Para motores con más de dos polos tendremos un giro geométrico menor e inversamente proporcional a 360° la cantidad de dos polos.

Por ejemplo, un motor de seis polos tendremos, en un ciclo completo, un giro de campo de 360° y un giro geométrico de $360 \times 2/6 = 120^\circ$. Esto a un 1/3 de velocidad en dos polos donde se concluye que

Grados eléctricos = grados mecánicos x p

Capítulo 2: Motores eléctricos

Deslizamiento (s)

Si el motor gira a una velocidad diferente que la velocidad de sincronía, o sea, diferente a la velocidad del campo giratorio, el bobinado del rotor corta las líneas de fuerza magnéticas del campo y, por las leyes de electromagnetismo, en él circulan corrientes inducidas.

Cuanto mayor sea la carga, mayor tendrá que ser el par necesario para moverla. Para obtener el par necesario, tendrá que ser mayor la diferencia de velocidades para que las corrientes inducidas y los campos producidos sean mayores. Por lo tanto, a medida que la carga aumenta, decae la velocidad del motor. Cuando la carga es nula (motor en vacío), el rotor gira prácticamente con la velocidad de sincronía. La diferencia entre la velocidad del motor n y la velocidad de sincronía, se llama deslizamiento s , que puede ser expresado en rpm, como una fracción de la velocidad de sincronía o como un porcentaje de ésta.

$$S \text{ (rpm)} = ns - n; \quad s = \frac{ns - n}{ns}; \quad s\% = \frac{ns - n}{ns} \times 100$$

Para un deslizamiento $s(\%)$ la velocidad del motor se expresa

$$n = ns \times \left(1 - \frac{s(\%)}{100}\right)$$

Ejemplo: ¿que deslizamiento tiene un motor de 6 polos, 50 Hz, si su velocidad es de 960 rpm?

$$s(\%) = \frac{1000 - 960}{1000} \times 100$$

$$s(\%) = 4\%$$

Características de la red de alimentación

El sistema

En general el sistema de alimentación es monofásico o trifásico. El sistema monofásico es utilizado en servicios domésticos, comerciales, rurales y por su parte el trifásico, en aplicaciones industriales.

De acuerdo a la región o el país la frecuencia puede ser 50 o 60 Hz.

Trifásico

Las tensiones trifásicas más usadas en las redes industriales son:

Baja tensión: 220, 380, 440 y 480 Vca

Media tensión: 2300, 4160 y 6600 Vca

El sistema trifásico estrella de baja tensión consiste de tres conductores de fase (L1, L2 y L3) y el conductor neutro (N), el cual no está conectado al punto estrella del generador o al secundario de los transformadores (según muestra la fig. 2.12)

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

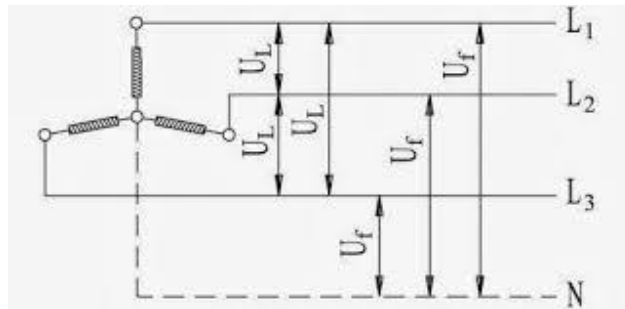


Fig. 2.12 Sistema trifásico

Monofásico

Las tensiones monofásicas normalizadas más comunes son: 115 (conocida como 110V), 127 V y 220 V.

Los motores monofásicos son conectados a dos fases (tensión de línea **V**) o a una fase y el neutro (tensión de fase **Vf**). Así, la tensión nominal del motor monofásico deberá ser la tensión **V** o **Vf** del sistema.

Cuando varios motores son conectados al sistema trifásico (formado por tres sistemas monofásico) se debe tener cuidado de distribuirlos de manera uniforme, evitando el desequilibrio de fases.

Monofásico con retorno por tierra (MRT)

El sistema monofásico con retorno por tierra (MRT) es un sistema eléctrico en el que la tierra funciona como un conductor de retorno de la corriente de carga. Se usa como solución para alimentar motores monofásicos con líneas que no tienen conductor de neutro. Dependiendo de la naturaleza del sistema eléctrico existente y las características del suelo donde será implantado (generalmente electrificación rural), se tiene

- a) Sistema monopolar
Es la versión más práctica y económica del MRT, pero su utilización solo es posible donde la salida de la subestación de origen es estrella triángulo
- b) Sistema monopolar con transformador de aislación
Este sistema tiene algunas desventajas más allá del costo del transformador, como:
 - 1) Limitación de la potencia del ramal a la potencia nominal del transformador de aislación
 - 2) Necesidad de reforzar la tierra del transformador aislador, pues si falla desenergiza todo el ramal.
- c) Sistema MRT en versión neutro parcial
Es empleado como solución para la utilización del MRT en regiones de suelos de alta resistividad, cuando se hace difícil obtener un valor de resistencia de la tierra del transformador dentro de los límites máximos establecidos en el proyecto.

Tensión Nominal

Es la tensión para la cual el motor fue proyectado

Capítulo 2: Motores eléctricos

Tolerancia de variación de tensión

Según la norma IEC 34-1 (ítem 12.3) el motor eléctrico de inducción debe ser capaz de funcionar de manera satisfactoria cuando se alimenta con tensiones hasta 10% por encima o debajo de su tensión nominal, siempre que la frecuencia sea la nominal. Si hubiera simultáneamente variación en la frecuencia, la tolerancia de variación de tensión es reducida de manera que la suma de las dos variaciones (tensión y frecuencia) no pase del 10%. El efecto aproximado de la variación de la tensión sobre las características del motor se muestra en la tabla 2

| Desempeño del motor | Tensión 20% encima de la nominal | tensión 10% encima de la nominal | Tensión 10% debajo de la nominal |
|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Par de arranque y par máximo | aumenta 44% | aumenta 21% | disminuye 19% |
| Corriente de arranque | aumenta 25% | aumenta 10 a 12 % | disminuye 10 a 12 % |
| corriente a plena carga | disminuye 11% | disminuye 7% | aumenta 11% |
| Deslizamiento | disminuye 30% | disminuye 17% | aumenta 23% |
| Velocidad | Aumenta 1.5% | aumenta 1% | disminuye 1.5% |
| Rendimiento | aumento pequeño | aumenta 1% | disminuye 2% |
| Factor de potencia | disminuye 5 a 15% | disminuye 3% | aumenta 1% |
| Temperatura | disminuye 5°C | disminuye 3°C | aumenta 6°C |
| Ruido magnetico sin carga | aumento perceptible | aumento ligero | disminucion ligera |

Tabla 2: efecto de la variación de tensión en un motor.

Tensión nominal múltiple

La gran mayoría de los motores son proporcionados con las terminales de las bobinas de conexión de modo poder funcionar en redes de por lo menos dos tensiones diferentes. Los principales tipos de conexión de terminales de motores para funcionamiento en más de una tensión son:

a) Conexión serie-paralelo

El bobinado de cada fase es dividido en dos partes (recordar que la cantidad de polos es siempre par, de modo que este tipo de conexión es posible). Conectando las dos mitades en serie, cada una quedar con la mitad de la tensión de fase nominal del motor. Conectándolas en paralelo, el motor podrá ser alimentado con una tensión igual a la mitad de la tensión anterior, sin que se altere la tensión aplicada a cada bobina.

Este tipo de conexión exige nueve terminales en el motor y la tensión nominal (doble) más común es 220/440V, o sea el motor, es conectado en paralelo cuando se alimenta en 220 y en serie cuando se alimenta en 440V.

La figura 2.5 muestra la numeración normal de los terminales y los esquemas de conexión para este tipo de motores, tanto para conexiones estrella como triangulo. El mismo esquema sirve para cualquier otro tipo de tensiones, siempre que una sea el doble que la otra, por ejemplo 230/460 V.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

b) Conexión estrella-triángulo

El bobinado de cada fase tiene las dos puntas accesibles desde fuera del motor. Si conectamos las tres fases en triángulo, cada fase recibirá la tensión de línea, como por ejemplo 220 Volts. Si conectamos las tres fases en estrella, el motor puede ser conectado a una línea con tensión igual a $220 \times \sqrt{3} = 380$ Volts sin alterar la tensión en el bobinado que continua siendo de 220 volts por fase, ya que:

$$V_f = V \times \sqrt{3}$$

Este tipo de conexión exige seis terminales en el motor y sirve para cualquier par de tensiones nominales, siempre que la segunda sea igual a la primera multiplicada por $\sqrt{3}$.

En los ejemplos 380/660 y 440/760 Volts, la tensión mayor declarada sirve solo para indicar que el motor puede ser accionado por un arrancador estrella-triángulo.

Los motores que poseen tensión nominal de operación arriba de 600 V deberán tener un sistema de aislación especial apto para esta conducción.

c) Triple tensión nominal

Podemos combinar los dos casos anteriores; el bobinado de cada fase es dividido en dos mitades para conexión serie-paralelo. Además todas las terminales son accesibles para poder conectar las tres fases en estrella o triángulo. De este modo tenemos cuatro combinaciones posibles de tensión nominal.

- 1) Conexión triángulo-paralelo;
- 2) Conexión estrella paralelo, siendo igual a $\sqrt{3}$ veces la primera;
- 3) Conexión triángulo serie, valiendo el doble de la primera;
- 4) Conexión estrella serie, valiendo $\sqrt{3}$ veces la tercera. Como esta tensión sería mayor de 600 Volts, se indica apenas como referencia de conexión estrella-triángulo.

Tensiones de conexiones usuales

La tabla 3 siguiente muestra las tensiones nominales múltiples más comunes en motores trifásicos y su aplicación a las tensiones de red usuales.

| Ejecución de los bobinados | tension de servicio | arranque con conexión estrella-triángulo |
|----------------------------|---------------------|--|
| 220/380 | 220 V | si |
| | 380 V | no |
| 220/440/230/460 | 220/230 V | no |
| | 440/460 V | no |
| 380/660 | 380 V | si |
| 220/380/440/760 | 220 V | si |
| | 380 V | no |
| | 440 V | si |

Tabla 3: tensión nominal para motores

Capítulo 2: Motores eléctricos

Nota:

- El arranque directo es posible en todos los casos de la tabla 3
- El voltaje de 660V o 760V es usada solamente para conexión con llave estrella-triángulo. Todas las conexiones para las diversas tensiones son efectuadas con los terminales localizados en la caja de terminales en la placa de identificación.

Frecuencia Nominal (Hz)

Es la frecuencia de la red para la cual el motor fue diseñado.

Tolerancia de la variación de frecuencia

Según la norma IEC 34-1 el motor eléctrico de inducción debe ser capaz de funcionar satisfactoriamente con frecuencias hasta de 5% por encima o por debajo de su frecuencia nominal. Si al mismo tiempo hubiera variación de tensión, debe ser tal que la suma de las dos variaciones no pase del 10%.

Conexión en frecuencias diferentes

Los motores trifásicos bobinados para 50 Hz podrán también ser conectados en 60 Hz:

- a) Conectando el motor de 50 Hz, con la misma tensión en 60 Hz
 - a. La potencia del motor será la misma
 - b. La corriente nominal será la misma
 - c. La corriente en el arranque disminuye el 17%
 - d. El par de arranque disminuye el 17%
 - e. El par máximo disminuye el 17%
 - f. La velocidad nominal aumenta el 20 %

Se deberá tener en cuenta los valores de potencia requeridos para motores que mueven equipos que poseen par resistente variable con la velocidad.

- b) Si se altera la tensión en proporción a la frecuencia
 - a. Aumenta la potencia del motor en 20%
 - b. La corriente nominal es la misma
 - c. La corriente en el arranque será aproximadamente la misma
 - d. El par de arranque aproximadamente será el mismo
 - e. El par máximo aproximadamente será el mismo
 - f. La velocidad de rotación nominal aumenta el 20%

Si el motor es conectado en 60 Hz en un bobinado de 50 Hz podremos aumentar la potencia en un 15% para 2 polos y 20% para 4, 6 y 8 polos.

Limitación de la corriente de arranque en motores trifásicos

Siempre que sea posible, el arranque de un motor trifásico de jaula de ardilla deberá ser a tensión plena. Debe tenerse en cuenta que para un determinado motor, las curvas de corriente y par son fijas, independientemente de la dificultad del arranque, para una tensión constante. En los casos en que la corriente de arranque del motor es elevada pueden ocurrir las siguientes consecuencias:

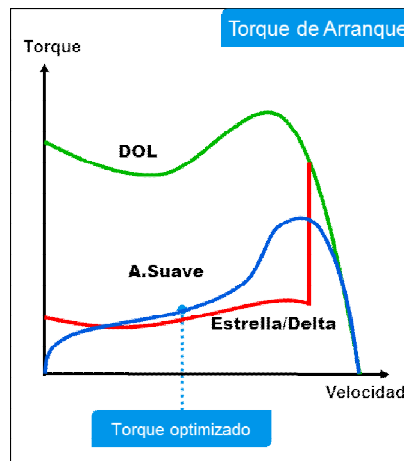
Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

- Gran caída de tensión en el sistema de alimentación de la red. Esto provoca interferencia en los equipos que se encuentran instalados en el sistema.
- El sistema de protección, (cables, contactor, relevador de protección) deberán ser sobredimensionados, ocasionando costos elevados;
- La imposición de las compañías suministradoras de energía eléctrica que limitan la caída de tensión de la red.

En el caso que el arranque directo no sea posible debido a los problemas mencionados, se puede usar un sistema de arranque indirecto para reducir la corriente de arranque. Figura 2.13

Estos sistemas de arranque indirecto son:

- Arranque estrella delta
- Arranque con autotransformador
- Arrancador suave
- Variador de velocidad



2.13 Métodos de arranque

2.7 Características de medición

Par Curva par x aceleración

Definición

El motor de inducción tiene par nulo a la velocidad síncrona. A medida que la carga aumenta, la velocidad cae gradualmente hasta un punto en el que el par alcanza el valor máximo y es capaz de entregar la velocidad nominal. Si el par resistente aumentara más, la velocidad de rotación caerá bruscamente, pudiendo llegar a trabar el rotor. Si representamos en un gráfico la variación del par con la velocidad para un motor normal, vamos a obtener la curva de la figura 2.14

Capítulo 2: Motores eléctricos

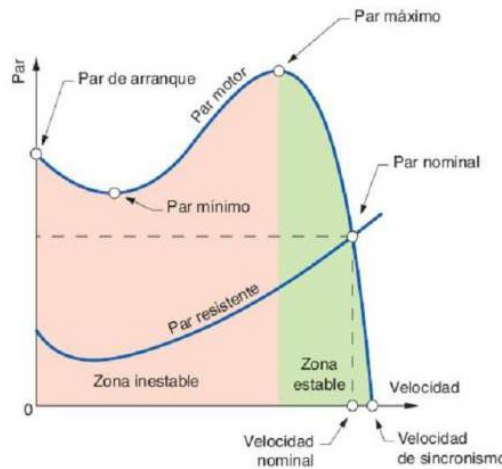


Fig. 2.14 Par de arranque

Par básico (Co) es el par calculado en función de la potencia y la velocidad síncrona (**ns**)

$$C_o \text{ (kgfm)} = \frac{716 \times P \text{ (hp)}}{n_s \text{ (rpm)}} = \frac{794 \times P \text{ (kW)}}{n_s \text{ (rpm)}}$$

$$C_o \text{ (Nm)} = \frac{7094 \times P \text{ (hp)}}{n_s \text{ (rpm)}} = \frac{9555 \times P \text{ (kW)}}{n_s \text{ (rpm)}}$$

Par nominal o a plena carga (Cn) es el par desarrollado por el motor a potencia nominal, baja tensión y frecuencias nominales.

Par con rotor bloqueado o par de arranque (Cp) es el par mínimo desarrollado por el motor bloqueado, para todas las posiciones angulares del rotor, bajo tensión y frecuencias nominales.

Esta definición tiene en cuenta que el par con rotor bloqueado puede variar un poco según la posición en la que se trava el rotor.

Este par puede ser expresado en **Nm** o más comúnmente, en porcentaje del par nominal

$$C_p \text{ (\%)} = \frac{C_p \text{ (Nm)}}{C_n \text{ (Nm)}} \times 100$$

- 1) En la práctica, el par con rotor bloqueado debe ser lo más alto posible para que el motor pueda vencer la inercia inicial de la carga y pueda acelerarla rápidamente, principalmente cuando el arranque es a tensión reducida.

Los valores del torque relativo a estos puntos son especificados por la norma IEC 34-12 y son definidos como sigue:

Par mínimo (Cmin): es el menor par desarrollado por el motor al acelerar desde velocidad cero hasta la velocidad correspondiente a su par máximo. En la práctica, este valor no debe ser muy bajo, o sea que la curva no debe presentar una depresión acentuada en la aceleración para que el arranque no sea muy

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

largo, lo que recalentaría el motor especialmente en casos de inercia alta o arranque con tensión reducida.

Par máximo (C_{max}): es el mayor par desarrollado por el motor, bajo tensión y frecuencia nominales, sin disminución brusca de velocidad.

En la práctica el par máximo debe ser lo más alto posible, principalmente por dos razones:

- 1) El motor debe ser capaz de vencer sin grandes dificultades, eventuales picos de carga como puede ocurrir en ciertas aplicaciones como ser molinos, prensas, mezcladoras, etc.
- 2) El motor no debe perder bruscamente la velocidad cuando momentáneamente ocurren disminuciones de tensión excesivas.

Categorías

Valores mínimos normalizados

De acuerdo a las características del par en relación de la velocidad y corriente en el arranque, los motores trifásicos de inducción con rotor de jaula de ardilla, son clasificados en categorías, cada una adecuada a un tipo de carga

Estas categorías son definidas por la norma IEC 34-12 y son las siguientes:

Categoría N

Par de arranque normal, corriente en el arranque normal, bajo deslizamiento. Constituyen la mayoría de los motores encontrados en el mercado y se prestan para ser utilizados moviendo cargas normales como pueden ser bombas, ventiladores.

Categoría H

Par de arranque alto, corriente de arranque normal, bajo deslizamiento. Usados para cargas que exigen mayor par de arranque como pueden ser transportadores, cargadores, cargas con alta inercia, molinos, etc.

Categoría D

Par de arranque alto, corriente de arranque normal, deslizamiento (mas de 5%). Son utilizados en prensas excéntricas (prensas) y maquinas similares, donde la carga presenta picos periódicos. También son usados en elevadores y cargas que necesitan un par de arranque muy alto y corriente de arranque limitada. En la tabla 4 y 5 se pueden observar los valores mínimos de par exigidos para los motores de categoría N y H (4, 6 y 8 polos) especificados por la norma IEC 34-12

Para los motores de categoría D, de 4, 6 y 8 polos y potencia nominal igual o inferior a 150 hp se tiene, según la norma NEMA MG1-12.38.3 que: la razón entre el par con rotor bloqueado (C_p) y el par nominal (C_n) no debe ser inferior a 2.75. La norma no especifica ni los valores de C_{min} y C_{max}.

La norma IEC 34-12 no especifica los valores de par exigido para motores de 2 polos, categoría H.

Capítulo 2: Motores eléctricos

| Número de polos | | 2 | | | 4 | | | 6 | | | 8 | | |
|-----------------------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Gama de potencias nominales | | Cp | Cmin | Cmax | Cp | Cmin | Cmax | Cp | Cmin | Cmax | Cp | Cmin | Cmax |
| CV | kW | pu | | | pu | | | pu | | | pu | | |
| >0.54<= 0.86 | >0.4<= 0.63 | 1.9 | 1.3 | 2 | 2 | 1.4 | 2 | 1.7 | 1.2 | 1.7 | 1.5 | 1.1 | 1.6 |
| >0.86 <= 1.4 | >0.63 <= 1. | 1.8 | 1.2 | 2 | 1 | 1.3 | 2 | 1.7 | 1.2 | 1.8 | 1.5 | 1.1 | 1.7 |
| >1.4 <= 2.2 | >1. <= 1.6 | 1.8 | 1.2 | 2 | 1.9 | 1.3 | 2 | 1.6 | 1.1 | 1.9 | 1.4 | 1 | 1.8 |
| >2.2 <= 3.4 | >1.6 <= 2.5 | 1.7 | 1.1 | 2 | 1.8 | 1.2 | 2 | 1.6 | 1.1 | 1.9 | 1.4 | 1 | 1.8 |
| >3.4<= 5.4 | >2.5 <= 4 | 1.6 | 1.1 | 2 | 1.7 | 1.2 | 2 | 1.5 | 1.1 | 1.9 | 1.3 | 1 | 1.8 |
| >5.4 <= 8.6 | >4 <= 6.3 | 1.5 | 1 | 2 | 1.6 | 1.1 | 2 | 1.5 | 1.1 | 1.9 | 1.3 | 1 | 1.8 |
| > 8.6 <= 14 | > 6.3 <= 10 | 1.5 | 1 | 2 | 1.6 | 1.1 | 2 | 1.5 | 1.1 | 1.8 | 1.3 | 1 | 1.7 |
| >14 <= 22 | >10 <= 16 | 1.4 | 1 | 2 | 1.5 | 1.1 | 2 | 1.4 | 1 | 1.8 | 1.2 | 0.9 | 1.7 |
| >22 <= 34 | >16 <= 25 | 1.3 | 0.9 | 1.9 | 1.4 | 1 | 1.9 | 1.4 | 1 | 1.8 | 1.2 | 0.9 | 1.7 |
| > 34 <= 54 | > 25 <= 40 | 1.2 | 0.9 | 1.9 | 1.3 | 1 | 1.9 | 1.3 | 1 | 1.8 | 1.2 | 0.9 | 1.7 |
| > 54<= 86 | > 40<= 63 | 1.1 | 0.8 | 1.8 | 1.2 | 0.9 | 1.8 | 1.2 | 0.9 | 1.7 | 1.1 | 0.8 | 1.7 |
| >86<= 140 | >63<= 100 | 1 | 0.7 | 1.8 | 1.1 | 0.8 | 1.8 | 1.1 | 0.8 | 1.7 | 1 | 0.7 | 1.6 |
| >140 <= 220 | >100 <= 160 | 0.9 | 0.7 | 1.7 | 1 | 0.8 | 1.7 | 1 | 0.8 | 1.7 | 0.9 | 0.7 | 1.6 |
| > 220 <= 340 | > 160 <= 250 | 0.8 | 0.6 | 1.7 | 0.9 | 0.7 | 1.7 | 0.9 | 0.7 | 1.6 | 0.9 | 0.7 | 1.6 |
| > 340 <= 540 | > 250 <= 400 | 0.75 | 0.6 | 1.6 | 0.75 | 0.6 | 1.6 | 0.75 | 0.6 | 1.6 | 0.75 | 0.6 | 1.6 |
| > 540 <= 860 | > 400 <= 630 | 0.65 | 0.5 | 1.6 | 0.65 | 0.5 | 1.6 | 0.65 | 0.5 | 1.6 | 0.65 | 0.6 | 1.6 |

Tabla 4 – par con rotor bloqueado (Cp), par mínimo de aceleración (Cmin) y par máximo (Cmax) para motores de categoría N, relativos al par nominal (Cn)

De acuerdo a la tabla 4 tenemos que:

- Los valores de Cp/Cn son iguales a 1.5 veces los correspondientes a la categoría N, pero nunca menor a 2
- Los valores de Cmin/ Cn son iguales a 1.5 veces los correspondientes a la categoría N pero nunca menor que 1.4.
- Los valores de Cmax/Cn son iguales a los correspondientes a la categoría N, pero nunca menor a 1.9 o al valor correspondiente de Cmin/CN.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

| Número de polos | | 4 | | | 6 | | | 8 | | |
|-----------------------------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Gama de potencias nominales | | Cp | Cmin | Cmax | Cp | Cmin | Cmax | Cp | Cmin | Cmax |
| CV | kW | pu | | | pu | | | pu | | |
| >0.54<= 0.86 | >0.4<= 0.63 | 3 | 2.1 | 2.1 | 2.55 | 1.8 | 1.9 | 2.25 | 1.65 | 1.9 |
| >0.86 <= 1.4 | >0.63 <= 1. | 2.85 | 1.95 | 2 | 2.55 | 1.8 | 1.9 | 2.25 | 1.65 | 1.9 |
| >1.4 <= 2.2 | >1. <= 1.6 | 2.85 | 1.95 | 2 | 2.4 | 1.65 | 1.9 | 2.1 | 1.5 | 1.9 |
| >2.2 <= 3.4 | >1.6 <= 2.5 | 2.7 | 1.8 | 2 | 2.4 | 1.65 | 1.9 | 2.1 | 1.5 | 1.9 |
| >3.4<= 5.4 | >2.5 <= 4 | 2.55 | 1.8 | 2 | 2.25 | 1.65 | 1.9 | 2 | 1.5 | 1.9 |
| >5.4 <= 8.6 | >4 <= 6.3 | 2.4 | 1.65 | 2 | 2.25 | 1.65 | 1.9 | 2 | 1.5 | 1.9 |
| > 8.6 <= 14 | > 6.3 <= 10 | 2.4 | 1.65 | 2 | 2.25 | 1.65 | 1.9 | 2 | 1.5 | 1.9 |
| >14 <= 22 | >10 <= 16 | 2.25 | 1.65 | 2 | 2.1 | 1.5 | 1.9 | 2 | 1.4 | 1.9 |
| >22 <= 34 | >16 <= 25 | 2.1 | 1.5 | 1.9 | 2.1 | 1.5 | 1.9 | 2 | 1.4 | 1.9 |
| > 34 <= 54 | > 25 <= 40 | 2 | 1.5 | 1.9 | 2 | 1.5 | 1.9 | 2 | 1.4 | 1.9 |
| > 54<= 86 | > 40<= 63 | 2 | 1.4 | 1.9 | 2 | 1.4 | 1.9 | 2 | 1.4 | 1.9 |
| >86<= 140 | >63<= 100 | 2 | 1.4 | 1.9 | 2 | 1.4 | 1.9 | 2 | 1.4 | 1.9 |
| >140 <= 220 | >100 <= 160 | 2 | 1.4 | 1.9 | 2 | 1.4 | 1.9 | 2 | 1.4 | 1.9 |

Tabla 5 par con rotor bloqueado (Cp), par mínimo de aceleración (Cmin) y par máximo (Cm), para motores de categoría H, relativos al par nominal (Cn).

La National Electrical Manufacturers Association (NEMA) estableció cierta clasificación para los motores de inducción basándose en sus características de par intensidad y velocidad. La Tabla 6 muestra las distintas clasificaciones de los motores de inducción trifásicos.

| Designación Nema | Descripción |
|------------------|--|
| A | Para motores diseñados con un par de arranque normal aproximadamente 15 % del de régimen su corriente de arranque es de 5 a 7 veces la nominal y el deslizamiento a plena carga es menor al 5 % y en el caso de los motores grandes es menor a 2%. |
| B | Motor con un par de arranque normal y baja corriente de arranque entre 4 a 5 veces su corriente nominal. Deslizamiento a plena carga entre 1.5 % y 3 %, en motores de más de 200 HP menor a 1%. |
| C | Motor con alto par de arranque, baja corriente de arranque y deslizamiento bajo a plena carga. |
| D | Motor con alto par de arranque, baja corriente de arranque y un alto deslizamiento. |
| E | Motor de bajo par de arranque, 130% del nominal y un bajo deslizamiento cercano al 2%. |
| F | Motor de bajo par de arranque y bajo corriente de arranque presenta un deslizamiento mayor que los de clase E. |

Tabla 6: clasificación de motores NEMA

En figura 2.15 se muestra la gráfica de cómo se comporta las diferentes clases de motor NEMA en base a su designación

Capitulo 2: Motores eléctricos

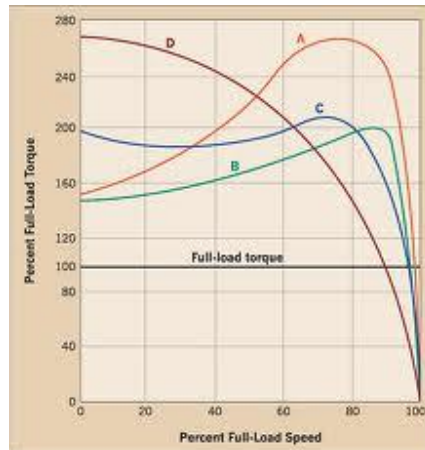


Fig. 2.15 Grafica motores NEMA

Inercia de la carga

Es la característica fundamental para verificar, a través del tiempo de aceleración, si el motor consigue mover la carga dentro de las condiciones exigidas por el ambiente o por la estabilidad térmica del material aislante.

Momento de inercia: es una medida de la resistencia que ofrece un cuerpo a un cambio en su movimiento de rotación alrededor de un eje dado. Depende del eje en torno al cual gira y también de la forma del cuerpo y de la manera en que la masa se encuentra distribuida. La unidad utilizada para el momento de inercia es kgm^2 .

El momento de inercia total del sistema es la suma de los momentos de inercia de la carga y del motor.

En el caso de una máquina que tiene velocidad diferente del motor (por ejemplo, en el caso de accionamiento a través de poleas o engranes), se deberá tener en cuenta la velocidad nominal del motor según se indica abajo:

$$J_{ce} = J_c \left(\frac{N_c}{N_n}\right)^2 + J_1 \left(\frac{N_1}{N_n}\right)^2 + J_2 \left(\frac{N_2}{N_n}\right)^2 + J_3 \left(\frac{N_3}{N_n}\right)^2$$

Donde:

J_{ce}: momento de inercia de la carga referido al eje del motor

J_c: Momento de la inercia de la carga

N_c: Velocidad de la carga

N_n: velocidad nominal del motor

$$J_t = J_m + J_c$$

La inercia total de una carga es un factor importante para la determinación del tiempo de aceleración.

Tiempo de aceleración: sirve para verificar si el motor consigue accionar la carga, o para dimensionar una instalación, equipo de arranque o protección, es necesario conocer el tiempo de aceleración, desde el instante que el equipo comienza arranca hasta que alcanza la velocidad nominal.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

El tiempo de aceleración puede ser determinado de forma aproximada por el par medio de aceleración.

$$t_a = \frac{2\pi \cdot rps \cdot J_t}{C_a} = \frac{2\pi \cdot rps \cdot (J_m + J_{ce})}{(C_{mmed} - C_{rmed})}$$

ta: tiempo de aceleración en segundos

Jt: momento de inercia total en kgm^2

rps: velocidad nominal en rotaciones por segundo

Cmmed: par medio de aceleración del motor en Nm

Crmed: par medio de aceleración de la carga relativo al eje en Nm

Jm: momento de inercia del motor

Jce: momento de inercia de la carga relativo al eje

Ca: par medio de aceleración

El par medio de aceleración se obtiene a partir de la diferencia entre el par motor y el par resistente. Su valor debería ser calculado para cada intervalo de velocidad (la sumatoria de los intervalos daría el tiempo total de la aceleración). Pero en la práctica es suficiente calcular el par medio gráficamente, o sea, la diferencia entre la media del par del motor y la media del par resistente.

Régimen de arranque

Debido al valor elevado de la corriente de arranque de los motores de inducción, el tiempo utilizado en la aceleración de las cargas de inercia considerable implica aumento de temperatura del motor. Si el intervalo de arranques consecutivos es corto, resulta en un aumento excesivo de la temperatura en los embobinados, dañándolos o reduciendo su vida útil. La norma IEC 34-12 establece un régimen de arranque mínimo que los motores deben de soportar:

- a) Dos arranques sucesivos, el primero con motor frío, o sea con sus embobinados a temperatura ambiente, y el segundo inmediatamente después, pero luego de haberlo desacelerado hasta lograr el reposo.
- b) Un arranque con motor caliente, o sea, con los bobinados a temperatura de régimen.

La primera condición simula el caso en que el primer arranque del motor es malogrado, como por ejemplo cuando la protección lo desenergiza, permitiendo un segundo intento. La segunda condición simula el caso de una desenergización del motor en forma accidental durante el funcionamiento normal, como por ejemplo por falta de energía en la red, permitiéndose retomar el funcionamiento luego del restablecimiento de la energía.

Como el calentamiento durante el arranque depende de la inercia de las partes giratorias de la carga movida, la norma establece los valores máximos de inercia de la carga.

Capítulo 3.- Protección de motores

3.1 Introducción

Es asumible que los dispositivos motrices que han sido adecuadamente planificados, dimensionados, instalados, operados y mantenidos no han de sufrir averías. En la vida real, sin embargo, dichas condiciones rayan en lo ideal. La frecuencia de estas fallas de los diferentes motores difiere, puesto que depende de las diferentes condiciones específicas de funcionamiento.

Las estadísticas nos muestran que es de esperar unos intervalos de paradas anuales entre el 0.5...4%. La mayoría de los problemas son debidos a sobrecargas. Los fallos en el aislamiento de los conductores, defectos a tierra, cortocircuitos entre espiras o en el bobinado, son debidos a una tensión excesiva, o también a la contaminación por humedad, aceite, grasa, polvo o productos químicos. Tabla 7

El porcentaje aproximado de cada una de estas causas individuales es de:

- Sobrecarga: 30%
- Daños del aislamiento: 20%
- Fallos de fases: 14%
- Daños en cojinetes: 13%
- Envejecimiento: 10%
- Daños en el rotor: 5%
- Otros: 8%

| Causa | Efecto | Posible daño |
|----------------------------------|--|---|
| Sobrecarga Termica | sobreintensidad y por tanto, inaceptable calentamiento en los bobinados | daños de empalmes soldados |
| Condiciones de arranque extremas | | jaula del rotor |
| Rotor bloqueado | | bobinados quemados |
| Alta Sobrecarga | | bobinados del estator |
| Baja tension | | |
| Operación Intermitente | | |
| Problemas de enfriamiento | | |
| Enfriamiento restringido | inaceptable calentamiento | Bobinados quemados |
| Temperatura ambiente muy elevada | | bobinados del estator |
| Causas electricas | | |
| condiciones de una sola fase | desequilibrio, sobreintensidad, calentamiento dependiente del tamaño del motor | Bobinados individuales o parte de los bobinados |
| tension desequilibrada | | bobinado quemado |
| defecto a tierra | | carga por cojinete averiado |
| espiras cortocircuitadas | | |
| bobinado cortocircuitado | | |
| Causas mecanicas | | |
| cabeceo | desgaste de cojinetes desigual | cojinetes dañados |
| desalineamineto | | |

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

| | | |
|---|--|--|
| dispositivo inadecuado instalado (ej. Carga elevada en cojinetes a causa de correas trapecoidales demasiado tensas) | | |
|---|--|--|

Tabla 7: fallas y causas en motores

Por lo tanto, se han de observar los siguientes puntos para garantizar un trabajo libre de averías por parte de un dispositivo motriz eléctrico:

- Diseño adecuado: se ha de seleccionar el motor adecuado a cada aplicación.
- Operación profesional: la instalación profesional y el mantenimiento regular son condiciones previas para una operación libre de averías.
- Adecuada protección del motor: ésta ha de cubrir todas las posibles áreas de problemas.

- No se disparará antes de que el motor se encuentre en situación de riesgo.
- Cuando dicha situación se dé, el dispositivo de protección se activará antes de que se produzca cualquier tipo de daño.
- Si el daño es imprevisible, el dispositivo de protección se activará rápidamente para restringir al máximo la extensión.

3.2 Requisitos de protección del motor

Incremento de la Temperatura

De acuerdo con las normas aplicables, todos los fabricantes de motores garantizan que las partes críticas de la máquina permanecen dentro del rango de temperaturas permisibles durante la operación en las condiciones especificadas y que las sobrecargas de corta duración no dañan el motor.

El dispositivo de protección del motor ha de permitir la plena utilización de éste y, por tanto, el funcionamiento eficaz de dicho motor y ha de ser capaz de reaccionar lo suficientemente rápido en caso de sobrecarga.

Comportamiento operacional

Los motores eléctricos son transformadores de energía eléctrica a energía mecánica. Dicho proceso produce pérdidas, que se manifiestan en forma de calor.

Las pérdidas totales de energía se dividen en dos componentes:

- *Pérdidas independientes de la corriente*: son prácticamente constantes, lo que significa que también se dan cuando no hay carga.
 - pérdidas del núcleo causadas por los cambios de polaridad y las corrientes de histéresis
 - pérdidas mecánicas a causa del rozamiento y de la fricción con el aire
- *Pérdidas dependientes de la corriente*: se incrementan con la carga, por ejemplo con la corriente incrementada.
 - pérdidas I^2R en el estator
 - pérdidas I^2R en el rotor

La pérdida de potencia se incrementa aproximadamente en proporción al cuadrado de la corriente. Esto último es, al menos, proporcional al deslizamiento del motor. De acuerdo con la **Figura 3.1**, para un rotor estático o bloqueado, la máxima corriente de arranque en el estator es de 4...8 la corriente nominal (**I_n**). Toda la potencia de entrada se transforma en calor. Si el rotor permanece bloqueado la temperatura de los bobinados de ambos, rotor y estator, se incrementa considerablemente, pues sólo se disipa parte del calor por la carcasa y esto con retraso. Si el motor no se desconecta a tiempo, los bobinados del rotor y del estator se pueden quemar.

Durante el periodo de arranque **t_A** , fluye una corriente de arranque del motor muy elevada **I_A** . Ello no produce un calentamiento excesivo si el intervalo de arranque permanece por debajo del límite

Capítulo 3. Protección de motores .

especificado por el fabricante del motor, el cual suele ser de 10 seg. El desequilibrado y corto pico de corriente de arranque se puede ignorar.

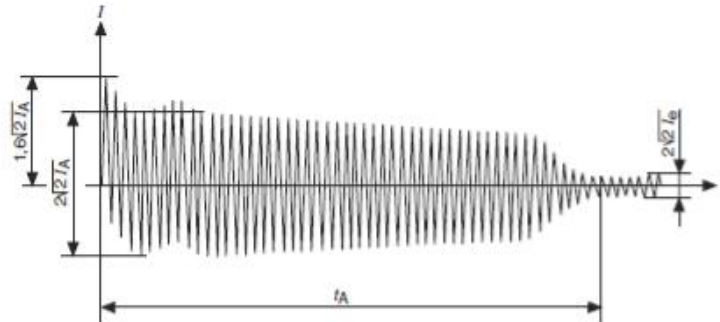


Fig. 3.1 Motor de jaula de ardilla conectado directo a la línea (DAL).

Las pérdidas por calor generado se reducen con el incremento de la velocidad. Después del arranque la temperatura se incrementa siguiendo una ley exponencial, según se muestra en la Figura 3.2, hasta alcanzar el nivel de temperatura final. Para cargas más elevadas, la temperatura final será correspondientemente más elevada. Incremento de la Temperatura en el bobinado del motor Debido a la elevada corriente de arranque I_A , la temperatura del bobinado se incrementa durante el intervalo de arranque t_A muy rápidamente. Después del arranque, la temperatura cae temporalmente, puesto que el calor es transferido al cuerpo del motor. Si el rotor permanece bloqueado, los bobinados alcanzarán su límite de temperatura muy rápidamente.

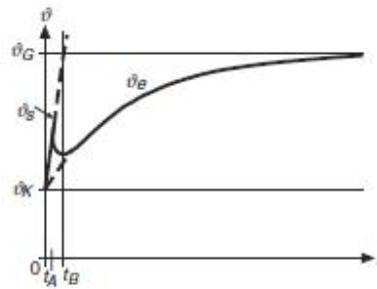


Fig. 3.2 curva de temperatura

Donde:

- θ_G límite de temperatura del aislamiento (clase de motor)
- θ_K temperatura del refrigerante t_A intervalo de arranque
- θ_S incremento de la temperatura durante el arranque
- θ_e incremento de la temperatura durante la operación continua con corriente nominal I_e
- t_B Intervalo de bloqueo

Los motores eléctricos son sistemas no homogéneos, térmicamente hablando. Los bobinados, el hierro del estator y del rotor poseen una capacidad y una conductividad térmicas diferentes. Una vez arrancado y durante las variaciones de carga, se lleva a cabo una compensación de la temperatura entre las diferentes partes de la máquina. El calor fluye desde el bobinado caliente hacia el hierro más frío, hasta que se logra el equilibrio de temperatura.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

Limitación de temperatura y tipos de aislamiento

Las temperaturas limitadas del bobinado y, por tanto, la carga permisible del motor vienen determinadas, ante todo, por el aislamiento del bobinado. Las recomendaciones IEC para máquinas eléctricas (IEC 34-1 e IEC 85), aparecen listadas en la tabla 8. Existe una diferencia entre:

- *Temperatura máxima del refrigerante*: el motor puede entregar su potencia nominal a dicha temperatura.
- *Temperatura límite en K* es el valor medio de las mediciones de resistencia.

La temperatura del bobinado es la suma de la temperatura del refrigerante y del calentamiento del bobinado. Si la temperatura del refrigerante está por debajo de 40 °C, se puede incrementar la carga del motor. Si pasa de 40 °C, la carga se deberá reducir.

- *Temperatura máxima permanente permisible en °C* para el punto más cálido del bobinado.

| Clase de aislamiento | Temp. Max.- refrigerante en °C | Temp. Máx. constante permisible en °C |
|----------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| E | 40 | 120 |
| B | 40 | 130 |
| F | 40 | 155 |
| H | 40 | 180 |

Tabla 8: Clases de materiales aislantes y máxima temperatura constante permisible en el bobinado

La Temperatura máxima constante permisible de los materiales de aislamiento individuales se compone de la temperatura del refrigerante, la temperatura por encima del límite y la tolerancia en el calentamiento. Este último es un factor de seguridad, debido a que la medición es por medio de resistencia Óhmica no establece el punto más cálido del bobinado.

Los motores con aislamiento especialmente resistente al calor se fabrican para temperaturas ambientales elevadas. Estas máquinas también pueden lograr entregar su potencia nominal con elevadas temperaturas del refrigerante.

Con mucho, el tipo de refrigeración más ampliamente distribuido es la auto ventilación, utilizando el aire ambiental. Por medio de un ventilador montado en el propio eje los motores auto refrigerados hacen circular una corriente de aire a través del motor. Esto significa que el refrigerante (aire) posee la misma temperatura que el área inmediatamente alrededor del motor. La capacidad de enfriamiento depende de la velocidad del motor.

Debido a su sencilla estructura sin aislamiento, los rotores normales de jaula de ardilla no poseen una temperatura crítica. Por ello, es permisible que alcancen temperaturas superiores de forma constante.

Pueden existir problemas durante el arranque de motores de media tensión y de tamaños mayores de baja tensión, puesto que el valor de las pérdidas puede limitar el intervalo de arranque. Dicho intervalo, junto con el intervalo de bloqueo permisible, están, por todo ello, limitados por la capacidad de calentamiento del rotor. Estos motores se denominan "de rotor crítico". El incremento elevado de la temperatura puede dar lugar a tensiones mecánicas y provocar el desoldado de los elementos cilíndricos que componen el rotor.

Para los motores con tipo de protección "**protección incrementada - EEx e**", el incremento de temperatura puede causar una ignición.

Capítulo 3. Protección de motores .

Envejecimiento del aislamiento

Si el límite de temperatura es conforme al del aislamiento, el periodo de vida del bobinado para todos los tipos de aislamiento se puede estimar en 100.000 h. Este valor corresponde, aproximadamente, a 12 años de operación continua a la potencia nominal. El envejecimiento del aislamiento es un proceso químico, el cual es altamente dependiente de la temperatura, como se muestra en la figura 3.3.

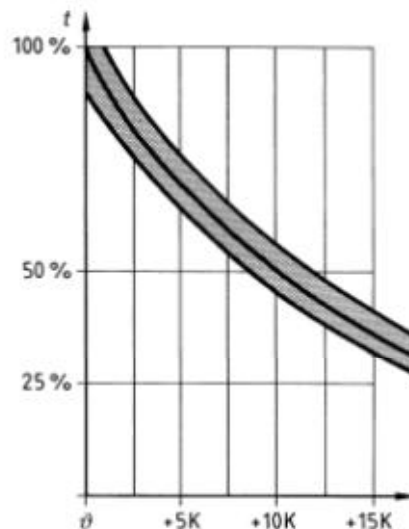


Fig. 3.3 grafica de envejecimiento del motor

Donde:

T Periodo de vida

θ Incremento de la temperatura

Debido al calentamiento, parte del material aislante se evapora, lo que se traduce en un incremento de la porosidad y, como resultado final, una reducción de la resistencia a la tensión. Se puede aplicar la siguiente regla: si la temperatura de trabajo es superior a la máxima permisible en un valor de 10K la vida se reduce a la mitad. Las temperaturas excesivamente elevadas durante intervalos cortos no producen un impacto considerable en la vida del motor. La temperatura de trabajo continua, sin embargo, no ha de exceder el máximo valor permisible.

Los métodos de diseño actuales tienen en cuenta las situaciones de sobrecarga del motor. Esto hace posible que se pueda hacer pleno uso de la reserva del ciclo de vida. Esto se denomina diseño orientado al ciclo de vida, el cual tiene como objetivo el permitir el funcionamiento del motor tanto tiempo como sea necesario que éste funcione.

Límites de respuesta

Para garantizar la protección de los motores estándar, la norma IEC ha establecido límites de respuesta para los relés de sobrecarga temporizados.

Los valores de acuerdo con IEC 947-4-1 son aplicables a relés de sobrecarga de carga equilibrada en los polos y compensación de temperatura ajustados a la corriente nominal de trabajo. Los Valores de corriente múltiplos del límite para relés de sobrecarga compensados en temperatura según IEC 947-4-1 se muestran en la figura 3.4

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado solido .

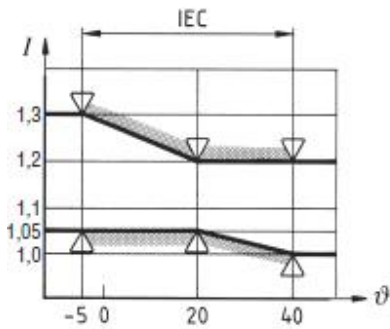


Fig. 3.4 Valores de corriente

Donde:

I sobrecarga como múltiplo del valor de corriente preestablecido

ϑ temperatura ambiente

IEC valores límite de acuerdo con IEC 947-4-1

Los límites de respuesta a +20 °C y carga equilibrada por polos para relés de sobrecarga térmicos con compensación de temperatura ambiente, de acuerdo con IEC 947-4-1. Tabla 9

| Funcion | | no respondera al siguiente en frío | para responder despues de un incremento de corriente | para responder en caliente | para responder en frío |
|--|-----|------------------------------------|--|----------------------------|------------------------|
| Múltiplo del valor de corriente preestablecido | | 1.05 | 1.2 | 1.5 | 7.2 |
| Tiempo resp. | 10A | ≥ 2 h | < 2 h | < 2 min | 2...10 s |
| acceso a | 10 | ≥ 2 h | < 2 h | < 4 min | 4...10 s |
| respuesta | 20 | ≥ 2 h | < 2 h | < 8 min | 6...20 s |
| clase: | 30 | ≥ 2 h | < 2 h | < 12 min | 9...30 s |

Tabla 9

Para una carga de dos polos en relés de sobrecarga térmica de tres polos (p.ej., por el fallo de una fase), se aplican los límites de respuesta listados en la tabla 10

| Tipo de rele de sobrecarga | Múltiplo del valor corriente ajustado | | Temperatura ambiente del entorno |
|--|---|--------------------|----------------------------------|
| | resp. T>2h, basado en rele en situacion de frío | respuesta t <= 2 h | |
| Temperatura ambiente compensada no sensible a fallo de fase | 3 polos 1,0 | 2 polos 1,32 | + 20 °C |
| | | 1 polo 0 | |
| Temperatura ambiente no compensada no sensible a fallo de fase | 3 polos 1,0 | 2 polos 1,25 | + 40 °C |
| | | 1 polo 0 | |
| Temperatura ambiente compensada sensible a fallo de fase | 2 polos 1,0 | 2 polos 1,15 | + 20 °C |
| | 1 polo 0.9 | 1 polo 0 | |

Capítulo 3. Protección de motores .

Tabla 10 Límites de respuesta para relés de sobrecarga térmica de tres polos con carga de dos polos sólo.

Fallo de fase

El fallo de una fase es la interrupción de un solo conductor. Entonces el motor sigue girando con solo dos fases y puede sufrir daños. La causa es, por ejemplo, un fusible que se funde. Los motores de tamaño pequeño y mediano son más críticos en el estator – esto significa que sólo puede sufrir daños el estator. Ha de diferenciarse entre:

- **Motores en conexión estrella:** estos motores no corren ningún riesgo debido a un fallo de fase. Como se muestra en la figura 3.5.1, las corrientes en los bobinados del motor, en el transcurso de la operación, con disturbios y sin ellos, en el momento de fallar un conductor, las corrientes se igualan en los otros dos. Debido al incremento de corriente, se produce una pérdida de potencia mayor en ambos bobinados activos. Globalmente, el motor trabaja frío porque el tercer bobinado frío produce compensación de la temperatura.

En el caso de sobre intensidad, el protector que detecta corriente se dispara en el momento adecuado. Los motores de tamaño pequeño y mediano (críticos en el estator) que se encuentran en configuración estrella normalmente no están sometidos a ningún riesgo en el caso de fallo de una fase.

- **Motores en conexión triángulo:** En conexión triángulo, las corrientes de fase en el funcionamiento normal son inferiores en razón del factor $1/\sqrt{3}$ que las corrientes en los bobinados $I_{Str} = 0,58 I_n$. Durante el fallo de una fase, La corriente se incrementa por motivos electromagnéticos en el 50%, aproximadamente, como se muestra en la figura 3.5.2. En el resto de los bobinados, que ahora están conmutados en serie, la corriente cae al 67%, aproximadamente. Este fenómeno se da porque el motor mantiene prácticamente constante la potencia transmitida al eje. El incremento absoluto de corriente en los bobinados, así como en las dos fases intactas, depende de la carga aplicada.

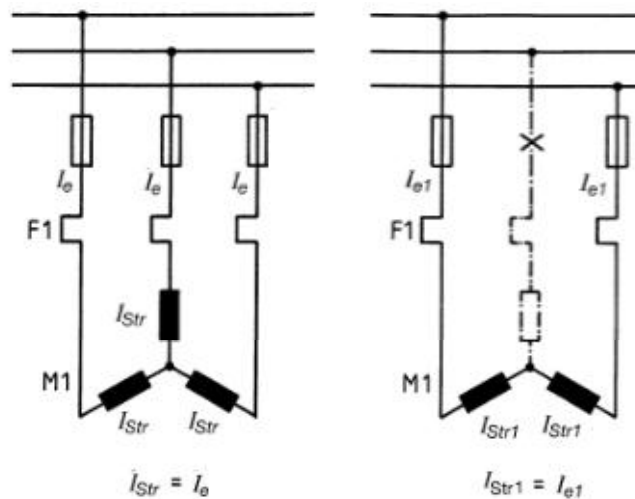


Fig. 3.5.1 falla de fase en un motor

En donde:

I_e I_{Str} Corrientes en las fases y bobinados en régimen normal.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

I_{L1} I_{Str1} Corrientes en las fases y bobinados en régimen anormal.

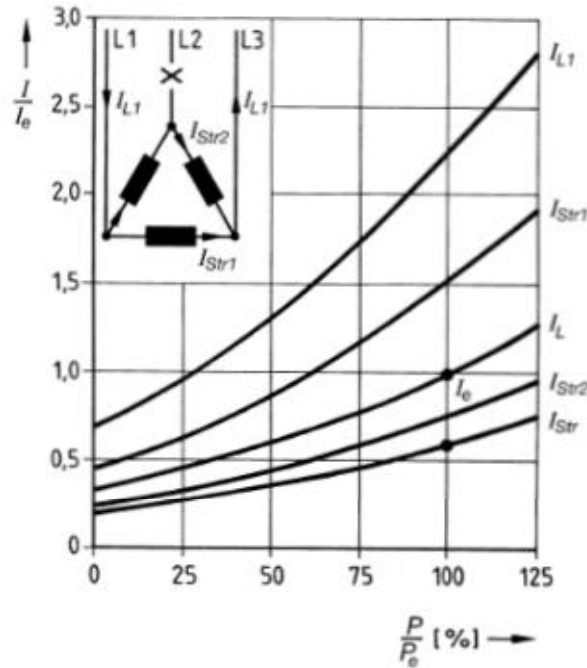


Fig. 3.5.2 falla de fase de un motor en conexión triángulo

En donde:

I_L I_{Str} Corrientes en las fases y bobinados en régimen normal.

I_{L1} I_{Str1} I_{Str2} Corrientes en las fases y bobinados en régimen anormal

Debido a que las corrientes en las bobinas son distintas, éstos no se calientan por igual. Debido a que el calor se intercambia entre las bobinas individuales, entre éstos y el cuerpo de hierro, el calentamiento del estator es proporcional a la suma de todas las pérdidas en todas las bobinas. En general, es aplicable lo siguiente:

- ***P_e ≤ 10kW***: no necesitan ninguna protección especial contra el fallo de fases, en tanto en cuanto la corriente de disparo en dos fases sea = 1.25 *I_e*.

En este caso, el calentamiento es, como mucho, igual al correspondiente a una carga trifásica simétrica.

- ***P_e ≥ 10 kW***: para estos motores se recomienda un protector electrónico de respuesta rápida con protección contra el fallo de fases. Además de la protección eléctrica, el corte rápido también contribuye a reducir las tensiones mecánicas de los cojinetes.

En diferentes aplicaciones se requieren protecciones de motores sensibles a los fallos de fase, principalmente, para los dispositivos mayores, o bien para sistemas con requerimientos de seguridad incrementados.

En el caso de alimentación del estator por una sola fase, las pérdidas en el rotor son considerablemente más elevadas si se comparan con la alimentación simétrica. Esto puede representar un peligro adicional, especialmente, en motores de rotor crítico.

Asimetría en la red

La tensión entre fases y en la red de inducción, no es exactamente igual. Las causas pueden ser, por ejemplo:

- Líneas de alimentación de la red muy largas.

Capítulo 3. Protección de motores .

- Contactos defectuosos en los interruptores automáticos de potencia y en los contactores.
- Terminales de conexión flojos.

IEC y NEMA definen la asimetría de la tensión así:

ΔU (%) = Máxima desviación del valor medio de las tensiones de las fases x 100 / valor medio de las tensiones de las fases

La asimetría en corriente de las intensidades de los bobinados resultante de las desviaciones de tensión alcanza valores del doble de 6 a 10 veces la asimetría de tensión y causan un calentamiento adicional y la correspondiente reducción del periodo de vida del motor. En la figura 3.6 se muestran los factores de reducción en la salida de un motor de acuerdo con IEC y NEMA.

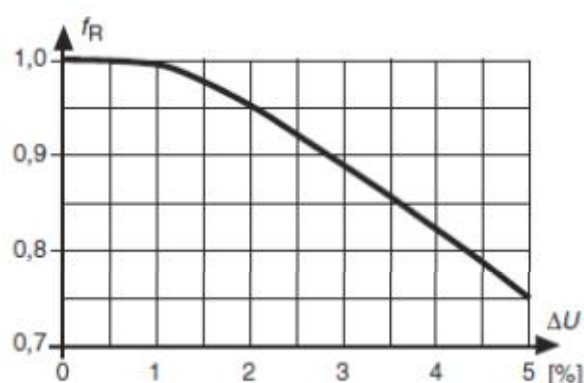


Fig. 3.6 Reducción de la potencia como resultado de una asimetría de tensión.

Donde:

f_R factor de reducción de salida del motor

ΔU asimetría de tensión [%]

Defecto a tierra

Los defectos en el aislamiento normalmente se producen a causa de picos de alta tensión y, con frecuencia, ocasionan la producción de cortocircuitos contra las zonas de la máquina conectadas a tierra. Las fuentes de dichas descargas son los relámpagos, conmutaciones de la red, descargas de condensadores y el funcionamiento de sistemas de ingeniería de potencia.

Cortocircuito

Se establece una diferencia entre cortocircuitos entre fases aisladas a tierra y cortocircuitos entre dos o tres fases con y sin contacto a tierra. Las principales razones de dichos cortocircuitos se deben a los daños en el aislamiento y a daños mecánicos. Las corrientes dependen de la impedancia del circuito y pueden alcanzar valores elevados. Si la duración del cortocircuito se incrementa, los daños materiales se incrementan en la misma medida. Por ello, los cortocircuitos han de detectarse y desconectarse rápidamente.

Requerimientos de protección del sistema

Bloqueos

El par de carga excesivo o ciertos daños mecánicos pueden provocar el bloqueo de un motor. Es recomendable desconectar de la red el dispositivo afectado tan pronto como sea posible. Al hacerlo, se evitan tensiones mecánicas y térmicas innecesarias a los elementos de transmisión y al motor. En general también se puede reducir el número de posibles accidentes.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

Baja carga

Los peligros debidos a la baja carga y a la correspondiente baja de corriente son posibles cuando los motores se refrigeran utilizando el mismo medio que bombean. Pueden darse problemas, por ejemplo, con ventiladores o con bombas sumergidas, debidos a una disminución o insuficiencia de volumen bombeado a causa de filtros obstruidos o de válvulas cerradas. Los dispositivos se pueden sobrecalentar a pesar de hallarse en régimen de subcarga. Tales máquinas se encuentran normalmente en lugares inaccesibles, tales como bombas en el interior de perforaciones, ocasionando reparaciones costosas cuando tienen lugar las averías.

El hecho de que se dé una subcarga durante una corriente baja también puede apuntar a un fallo mecánico. Los ejemplos de este tipo son los acoplamientos defectuosos, rotura de ejes, cintas transportadoras rotas, aspas de ventilador rotas, etc. Tales condiciones de subcarga no suelen representar un peligro para el motor, sin embargo, sí producen periodos de parada en la planta y pueden ocasionar daños al sistema. La rápida detección del fallo ayuda a reducir estos tiempos y los posibles accidentes.

Rotación incorrecta

La conmutación de un dispositivo que posea una rotación incorrecta puede dañar severamente un sistema y, con frecuencia, está ligada a una elevada probabilidad de accidentes. En los sistemas móviles, tales como máquinas de construcción, transportes de enfriamiento, etc., la rotación incorrecta suele ir precedida de anteriores reparaciones o de trabajos llevados a cabo en la red de distribución eléctrica. Se ha de evitar la conmutación de dichos dispositivos si su rotación no es la adecuada.

Motores en áreas con riesgo de explosión

Tipo de protección contra la ignición y seguridad incrementada EEx e

Bajo ciertas condiciones, las mezclas de algunos gases y vapores inflamables con el aire pueden entrar en combustión debido a chispas o a elevadas temperaturas. La temperatura de ignición depende de la composición química de la mezcla y de la proporción.

La combustión de una mezcla que puede explotar se puede evitar, en el caso de los motores, si se asegura que la temperatura máxima del punto más cálido está por debajo de la temperatura crítica de ignición en dicha área. Desde luego, tampoco se ha de exceder la temperatura límite del aislamiento del bobinado.

Significación del tiempo t_E

El tiempo t_E es, según la figura 3.7, el intervalo de tiempo que transcurre desde que el motor alcanza la temperatura nominal de trabajo hasta que llega al límite permisible. Se calcula en el caso más desfavorable, por ejemplo para un rotor bloqueado y la máxima temperatura ambiente permisible. Por lo tanto, un dispositivo de protección del motor ha de desconectar al motor durante la corriente de arranque I_A (el valor más elevado para un rotor bloqueado) dentro del intervalo de tiempo t_E . Esto significa que el motor no alcanzará la temperatura crítica.

Definición del periodo de tiempo t_E , dentro el cual un motor con el rotor bloqueado eleva su temperatura desde el valor nominal de trabajo hasta su temperatura límite.

Capítulo 3. Protección de motores .

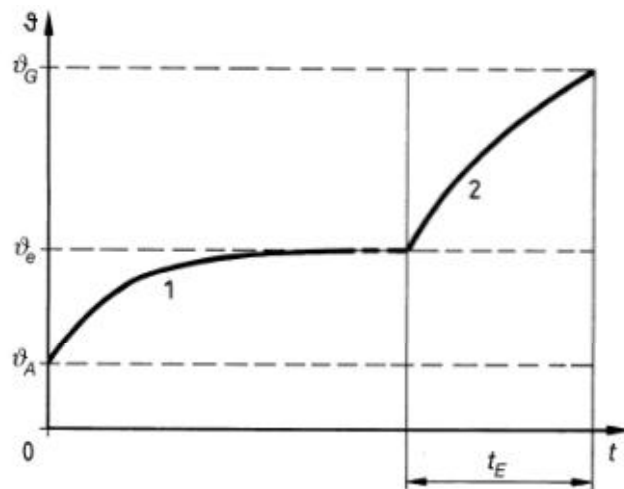


Figura 3.7 comportamiento de la temperatura

En donde:

- V** Temperatura
- V_A** Máxima temperatura ambiente permitida por el motor
- V_e** Temperatura nominal de trabajo
- V_G** Temperatura límite
- t** Tiempo
- 1** Incremento de Temperatura durante las condiciones nominales de trabajo
- 2** Incremento de Temperatura en un motor bloqueado

En los países donde estén en vigor los requerimientos de prueba general, la curva tiempo/corriente se incluye automáticamente. En estos casos sólo se podrán utilizar los dispositivos que hayan sido comprobados de esta manera para proteger los motores EEx e .

3.3 Medidas de protección

Para el control de temperatura de los motores se utilizan los dos métodos siguientes mutuamente complementarios:

- **Medición de la temperatura con detectores instalados en el bobinado del estator:** el detector mide la temperatura directamente del bobinado del motor, pero sólo en el lugar en que esté implantado. A esto se añade que la inercia térmica de éste frecuentemente excede los 10 seg., lo cual se debe tener en cuenta.

No se mide lo siguiente:

- sobrecarga del rotor
- fallo de fase
- asimetría
- cortocircuito
- defectos a tierra

- **Medición de corriente en la línea de suministro:** es útil si el incremento de temperatura del motor es conocido en función de la corriente consumida por éste. Los dispositivos de protección pueden ajustarse de acuerdo con la corriente nominal de trabajo, así como para situaciones de sobrecarga breve.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

Medidas de protección dependientes de la Temperatura

Problemas de aplicación

Aplicaciones

Los sensores de temperatura se encuentran instalados en el codo del bobinado del estator. Por ello, miden directamente la temperatura crítica del motor y se utilizan, principalmente, en las condiciones de trabajo siguientes:

- Carga variable
- Régimen de parada - arranque
- Frenado por contracorriente
- Temperatura ambiental elevada
- Mala refrigeración, por ejemplo, en alrededores polvorientos
- Motores con control de velocidad.

En varias aplicaciones el detector de temperatura por sí mismo proporciona una protección insuficiente o, incluso, nula. En estos casos y se utilizan protectores adicionales por medición de la corriente. Esto es necesario para:

- Motores de rotor crítico
- Protección en casos de
 - fallo a tierra
 - cortocircuito
 - motor bloqueado
 - Motores de baja inercia térmica
- Reacción rápida en el caso de fallo de una fase y de asimetría.

Inercia térmica

Para los motores de baja inercia térmica, como es el caso de los motores de refrigeración encapsulada térmicamente, o bien para los dispositivos de bombas sumergidas, el retraso térmico entre el bobinado y el sensor puede llegar a ser crítico. El periodo de interacción, dependiendo del tipo de sensor y de su localización en el interior del bobinado, es inferior a 10 segundos. Los cambios rápidos de temperatura representan un problema de protección.

Durante el régimen continuo de trabajo, bobinado y sensor poseen prácticamente la misma temperatura durante el arranque, o bien durante grandes variaciones de la carga, como es el caso, por ejemplo, de un rotor bloqueado, en que la temperatura del bobinado se incrementa muy rápidamente. La temperatura del sensor está en línea con la constante de tiempo de interacción, que se muestra en la figura 3.8.

Capítulo 3. Protección de motores .

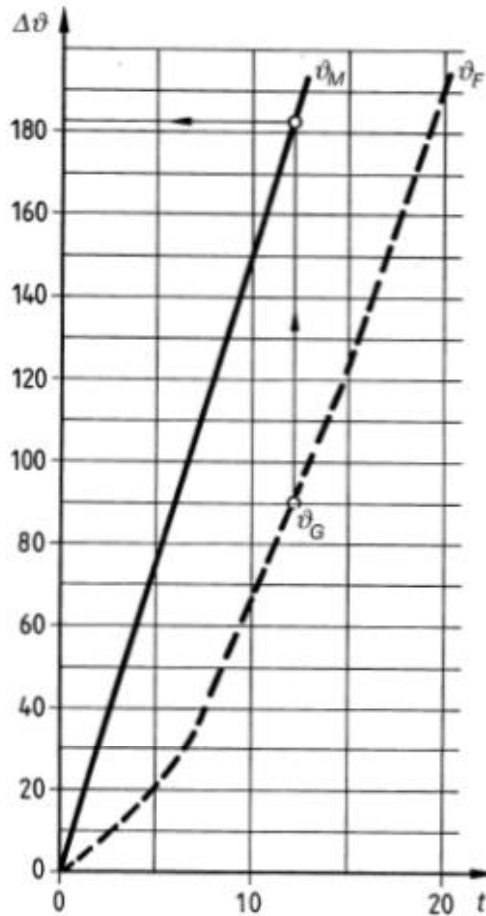


Fig. 3.8 Curva de Temperatura

Debido a la constante de tiempo de interacción del sensor, un bobinado con aislamiento de clase B ya ha alcanzado la temperatura de $\Delta v = 180$, K por encima de la temperatura del refrigerante de 40°C cuando el sensor alcanza el límite de temperatura.

- Δv** Diferencia de temperatura cuando la temperatura del refrigerante está por encima de 40°C .
- v_M** Desarrollo de la temperatura del bobinado en un motor con incremento de temperatura de 15 K/s .
- v_F** Desarrollo de la temperatura del sensor.
- v_G** Temperatura límite para aislamiento de clase B.
- T** Tiempo en segundos.

Por ejemplo, durante el bloqueo de un motor sumergido, la densidad de corriente en el bobinado del estator puede llegar hasta 50 A/mm^2 . En este caso, la temperatura del bobinado se eleva rápidamente a 15 K/s aproximadamente.

Cuando un sensor que posee una constante de interacción de 8 s alcanza la temperatura límite permisible para el aislamiento de clase B, la temperatura del bobinado ya ha llegado a un valor superior a 180 K por encima de la temperatura del refrigerante, que es de 40°C . El motor puede hallarse en situación de riesgo.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

Sensores bimetálicos en el bobinado

Los sensores bimetálicos consisten en dos metales con diferentes coeficientes de dilatación térmica enrollados uno encima del otro. Al calentarse el conjunto, éste se dilata de forma desigual, pudiendo disparar el contacto de un interruptor.

Poseen la ventaja de que, en principio, la tensión de control se puede aplicar directamente al interruptor, lo cual hace innecesaria la utilización de un mecanismo especial de disparo. Sin embargo, su aplicación está restringida debido a los siguientes inconvenientes:

- Largo retraso térmico
- Precisión reducida. La temperatura de disparo puede verse afectada por un acoplamiento descuidado.
- Gran tamaño, si se compara con los actuales sensores.

Sensores PTC

El sensor más comúnmente utilizado en motores de baja tensión es el termistor con coeficiente de temperatura positivo (PTC). Las resistencias PTC también se denominan termistores. Los sensores miniaturizados (figura 3.9) poseen una baja resistencia por debajo de la temperatura nominal de respuesta, incrementándose ésta en el margen especificado de temperaturas de respuesta, según se ilustra en la figura 3.10, en varios márgenes. Este cambio de resistencia se evalúa por medio de un dispositivo de disparo. La temperatura nominal de respuesta está definida por el sensor PTC y, por ello, es independiente del dispositivo de disparo.

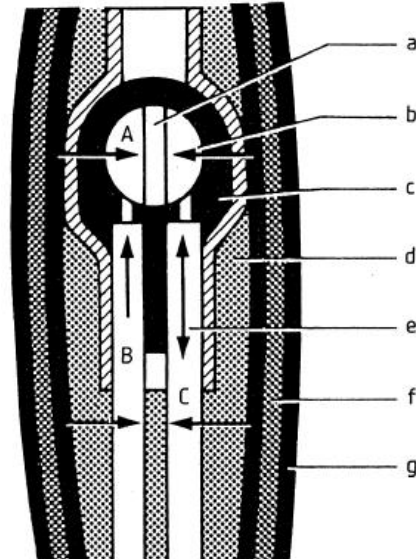


Figura 3.9 Termistor

En donde:

- a sensor PTC (termistor);
- b punto de soldadura;
- c aislamiento del sensor;
- d aislamiento del bobinado;
- e hilos de conexión del sensor;
- f hilos del bobinado;

Capítulo 3. Protección de motores .

g aislamiento del conductor;
A, B, C dirección del flujo de calor;

Los sensores se instalan en el interior del codo del bobinado del motor, en el punto de salida de aire, y la temperatura nominal de respuesta TNF es la idónea a la correspondiente clase de aislamiento. La respuesta del sensor se puede utilizar para desconectar el interruptor del motor, o para detección.

Si es necesario emitir un aviso de advertencia antes de que se alcance la temperatura crítica, será necesario instalar otros sensores calibrados a una temperatura nominal de respuesta inferior.

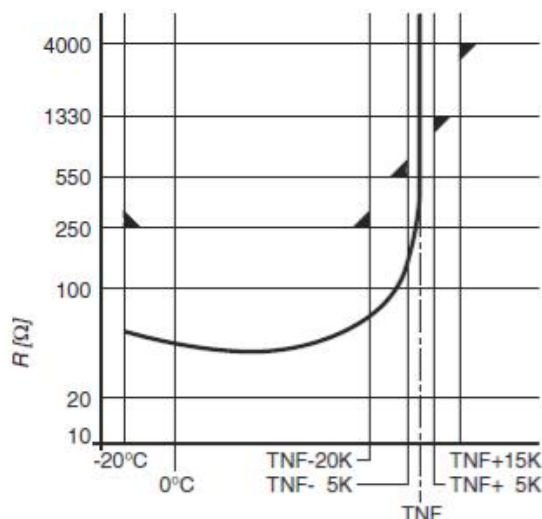


Fig. 3.10 Curva característica de un sensor PTC según la IEC34-11-2

R Resistencia en el circuito del sensor en Ω .

v Temperatura.

TNF Límite de tolerancia de la temperatura nominal de respuesta en $^{\circ}\text{C}$ valores de corte definidos.

Sensores lineales de temperatura

Los sensores de platino Pt 100 se utilizan normalmente como sensores de temperatura lineales. El valor de su resistencia cambia en proporción a la temperatura. Como se puede ver en la figura 3.11, a 0°C los sensores Pt 100 poseen una resistencia de 100Ω . Se utilizan predominantemente en motores grandes. Los motores de media tensión normalmente poseen sensores Pt 100 incorporados como característica estándar.

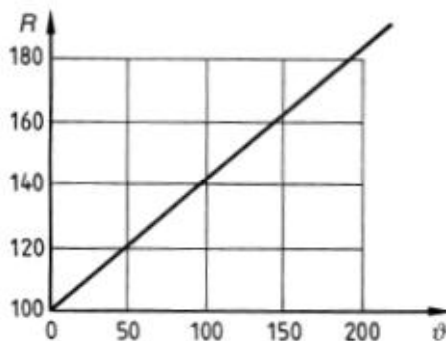


Fig. 3.11 Curva característica de resistencia de un sensor Pt100.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

Donde:

ν temperatura [$^{\circ}$ C]

R resistencia [Ω]

Al contrario que los sensores PTC, cuya temperatura nominal de respuesta viene determinada por el sensor, la temperatura de respuesta de los sensores Pt 100 puede ajustarse libremente en el dispositivo de disparo. Además de esto, se puede fijar cualquier valor de temperatura para el disparo del aviso de advertencia, reposición o control de carga. Los sensores Ni 100 -, Ni 120 - y Cu 10 - se utilizan raras veces.

Protección dependiente de la corriente

Función

El consumo de corriente del motor constituye una medida de la elevación de su temperatura. Como no se mide la temperatura del bobinado del estator o del cuerpo del rotor, esta conexión sólo se aplica en las siguientes condiciones marginales, sujetas a:

- La carga nominal del motor se refiere a la máxima temperatura del refrigerante de 40° C.
- Las sobrecargas temporales, por ejemplo, durante el arranque, han de ser toleradas, como se ilustra en la figura 3.12.

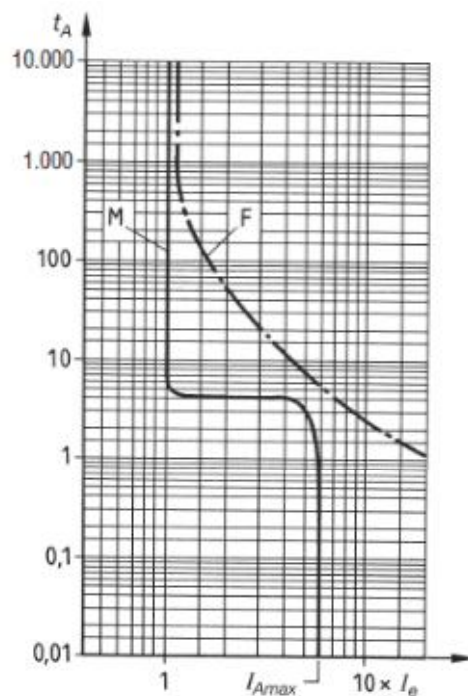


Fig. 3.12 Curva de sobrecarga

Donde:

M características de arranque del motor;

F características de disparo por la protección bimetálica;

I_{Amax} corriente de arranque I_e corriente nominal;

t_A Intervalo de arranque [s]:

Capítulo 3. Protección de motores .

Las sobrecargas del motor han de permitir el arranque. La curva F, característica del dispositivo siempre ha de permanecer por encima de la curva M, característica del motor. Para sistemas de protección que detectan corrientes no son aplicables los problemas y restricciones expuestos en los sensores de temperatura.

Características del dispositivo

Funcionamiento a régimen constante

Durante la el funcionamiento en condiciones invariables, se puede prevenir el rebasamiento de la temperatura límite, como se muestra en la figura 3.13, por medio de un sencillo dispositivo de protección cuyas curvas de calentamiento correspondan a las características del motor. Como condición previa se estipula que el protector sea térmicamente igual de rápido o más rápido que el motor.

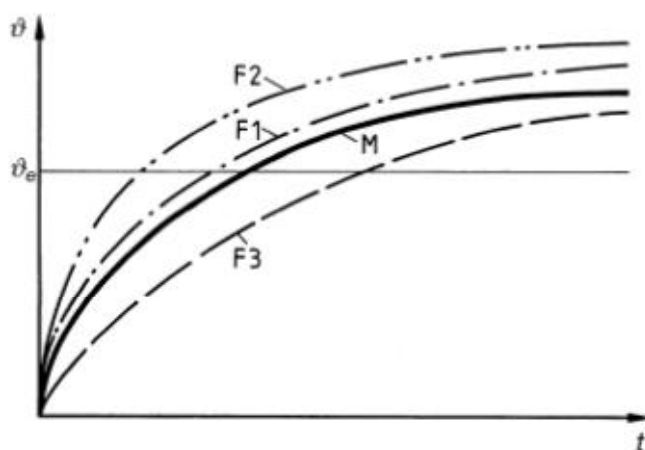


Fig. 3.13 Características de Incremento de Temperatura de un motor.

Donde:

| | |
|-----------------------|--|
| M | curva térmica del motor |
| F1, F2 | dispositivos rápidos de protección del motor: el motor está protegido contra la sobrecarga |
| F3 | dispositivo lento de protección del motor: el motor se puede llegar a calentar hasta un valor no permisible durante una sobrecarga |
| v | Temperatura |
| v_{le} | temperatura durante el régimen de funcionamiento nominal |
| T | tiempo |

• **Dispositivo de disparo más rápido que la curva de incremento de temperatura del motor:** el motor está protegido contra una sobrecarga. El dispositivo de protección se dispara mucho antes y evita la utilización plena del motor.

• **Dispositivo de disparo más lento que la curva de incremento de temperatura del motor:** El motor se puede calentar hasta un valor prohibido.

La curva de incremento de temperatura del motor se puede proyectar de forma precisa con la ayuda de los dispositivos de protección de motores de alta calidad. Así el motor posee una protección segura, permitiendo su máxima utilización.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

Funcionamiento intermitente

Durante una carga constante o un calentamiento y desconexión, las condiciones térmicas son relativamente sencillas. Durante condiciones cambiantes de funcionamiento, p. ej., en un ciclo periódico, es muy importante que el motor y el protector compartan la misma condición transitoria. La figura 3.14 muestra cómo divergen las diferentes curvas características. En el transcurso de un ciclo intermitente, la temperatura del bobinado, comparada con la del núcleo de hierro, cambia muy drásticamente. Para periodos de ciclo por debajo de 5...10 minutos, la última (núcleo) permanece prácticamente constante. Además de esto, las condiciones de refrigeración de los motores autoventilados durante el funcionamiento y las detenciones son considerablemente diferentes. La constante de tiempo de enfriamiento es entre 2 y 5 veces más larga que la constante de tiempo de calentamiento. Los dispositivos bimetálicos y los de tipo electrónico sencillo no tienen en cuenta este hecho.

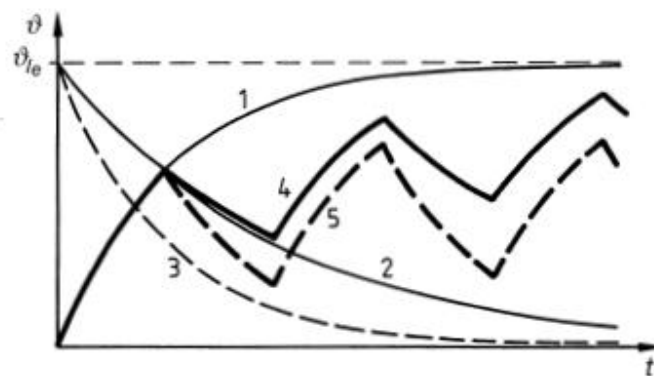


Figura 3.14 Grafica funcionamiento intermitente

Características de Incremento y disminución de Temperatura del motor y del relé térmico durante cargas intermitentes, en donde:

- 1 características de incremento de temperatura del motor y del relé térmico;
 - 2 características de enfriamiento del motor;
 - 3 características de enfriamiento del relé térmico, sin tener en cuenta las diferentes condiciones de refrigeración habidas durante el funcionamiento y la parada;
 - 4 desarrollo de la temperatura del bobinado del motor;
 - 5 desarrollo de la temperatura del bobinado proyectada por el relé térmico;
- θ/le** temperatura durante el funcionamiento nominal;
 t tiempo.

El comportamiento transitorio de los diferentes motores no es el mismo. No obstante, los dispositivos protectores han de proyectar el comportamiento de la temperatura del motor lo más exactamente posible. En la mayoría de los casos es necesaria una solución de compromiso, la cual se manifiesta como un motor ligeramente sobre protegido.

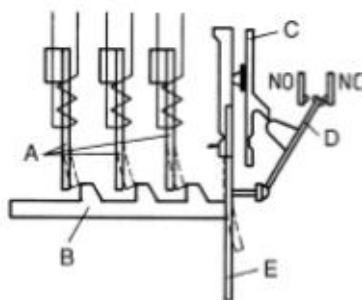
Los dispositivos electrónicos de protección mencionados pueden permitir la plena utilización del motor también en los casos de funcionamiento intermitente.

Bimetálico – Principio de protección

Función

Capítulo 3. Protección de motores .

Los relés de sobrecarga con retraso térmico y los protectores de sobrecargas de la mayoría de los interruptores automáticos de potencia utilizan láminas bimetálicas, las cuales se calientan por efecto de la corriente del motor. Como puede verse en la figura 3.15, los bimetales disparan un contacto auxiliar, vía una barra de disparo, que interrumpe el circuito de la bobina del contactor del motor.



3.15 Esquema bimetálico

Donde:

- A bimetales de calentamiento indirecto;
- B actuador de disparo;
- C actuador de rearme;
- D contacto móvil;
- E bimetálica de compensación.

La compensación de temperatura actúa en un margen de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, de acuerdo con IEC.

En los interruptores automáticos de potencia el disparo es directo. Podemos distinguir los siguientes tipos de calentamiento:

- **Calentamiento directo:** la corriente de calentamiento que es de 20...70 A, aproximadamente, fluye directamente por la lámina bimetálica. No se permiten corrientes inferiores, porque su capacidad de caldeo ($P_v = I^2 R$) es insuficiente para producir la deflexión, figura 3.16

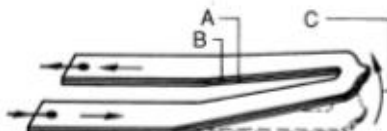


Fig. 3.16 Calentamiento directo

- **Calentamiento indirecto:** la corriente de calentamiento no fluye directamente por la lámina bimetálica, sino a través de un bobinado calefactor alrededor de dicha lámina bimetálica. Es adecuado para corrientes comprendidas entre 0,1...20 A aproximadamente, figura 3.17

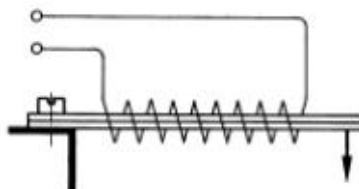


Fig. 3.17 Calentamiento indirecto

- **Calentamiento por transformador:** la corriente del motor ($> 60\text{ A}$) fluye a través del bobinado primario de un transformador. El bobinado de calefacción del bimetálica se conecta al secundario de dicho

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

transformador. En caso de cortocircuito, el relé bimetalico está totalmente protegido en la práctica, figura 3.18.

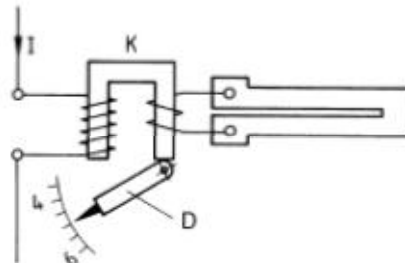


Fig. 3.18 Calentamiento por transformador

En donde:

- A aleación de elevada dilatación
- B aleación de baja dilatación
- C deformación causada por el calentamiento
- D áncora

Los relés térmicos, en su mayoría, están compensados en temperatura. Existe un bimetalo adicional de compensación en la ruta de transmisión de energía desde el bimetalo de corriente hasta el contacto de disparo, el cual previene los cambios en las características de disparo del relé debidos a la temperatura ambiente, la cual, de acuerdo con IEC, se encuentra entre -5 y $+40$ °C, y podría afectar negativamente al objeto protegido. Como la carga permisible del motor se reduce al incrementarse la temperatura del refrigerante, los relés habitualmente están ligeramente subcompensados por razones de seguridad.

Durante el arranque seguido de una carga constante, el relé térmico protege al motor sin problemas. Sin embargo, durante el funcionamiento intermitente con alta frecuencia de conmutación y carga variable, la protección del motor es insuficiente de por sí, debido a que el relé térmico sólo puede reproducir de forma aproximada el comportamiento térmico del motor. Durante el funcionamiento intermitente con arranques frecuentes, la constante de tiempo del bimetalo, que es considerablemente más reducida comparada con la del motor, provoca disparos prematuros. Esto significa que, durante el funcionamiento intermitente, la diferencia entre la temperatura del motor y la simulación del relé térmico se incrementa constantemente.

Resistencia de cortocircuito

Debido a razones térmicas, la resistencia de cortocircuito de los relés térmicos directamente calentados es más elevada que la de los relés con calentamiento indirecto.

Durante las corrientes nominales elevadas, los relés térmicos se caldean por medio de transformadores de corriente. Proporcionan resistencia de cortocircuito hasta los valores de corriente más elevados. Los siguientes valores de resistencia de cortocircuito son aplicables para la corriente $I_e F$, ajustada en el relé térmico:

- Relés térmicos indirectamente calentados hasta $16 I_e F$ max
- Relés térmicos directamente calentados hasta $30 I_e F$ max
- Relés térmicos con transformador de corriente hasta $50 I_e F$ max

Capítulo 3. Protección de motores .

Funcionamiento con una sola fase

La energía necesaria para disparar el mecanismo de conmutación sólo se puede generar por medio de tres elementos bimetálicos juntos. Estos tres relés bimetálicos han de conmutarse en serie, tal y como se muestra en la figura 3.19, para asegurarse de que la corriente también fluye por ellos durante el funcionamiento con una sola fase.

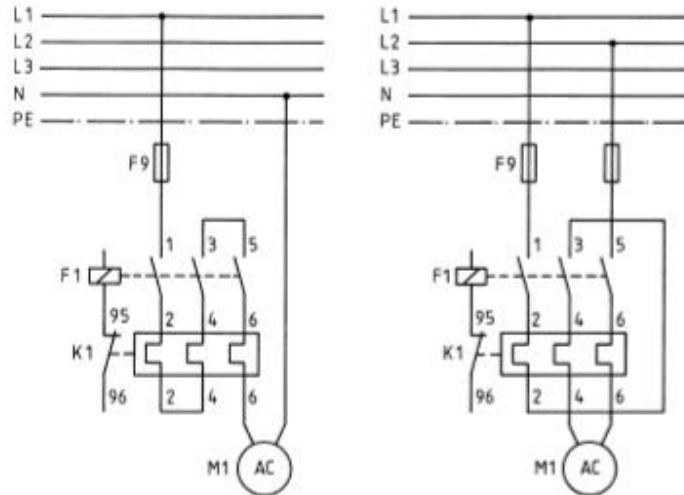


Fig. 3.19 Conexión a una sola fase

Fallo de fase

Los motores conectados en estrella no presentan ningún riesgo térmico en el caso de fallar una fase. Para los motores conectados en triángulo (figura 3.20 y 3.21), se deben establecer diferencias entre:

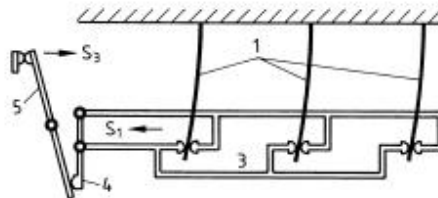


Fig. 3.20 Disparo durante una sobrecarga trifásica

- Salida nominal $P_e < 10 \text{ kW}$: la corriente de arranque por fase del relé térmico debe ser de una magnitud $< 1,25 I_e$
- Salida nominal $P_e > 10 \text{ kW}$: las protecciones del motor han de estar equipados con un disparador diferencial.

Las regulaciones de seguridad de diversas industrias requieren disparadores diferenciales, por ejemplo, las industrias química, petroquímica y del gas.

Los principio de disparo diferencial para los relés térmicos (figura 3.21)

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado solido .

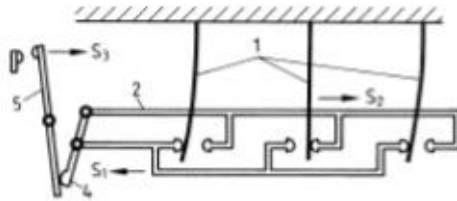


Fig. 3.21 Disparo relé diferencial.

En donde:

- 1 lamina bimetálica;
- 2 actuador de fallo de fase 5 contacto de disparo (accionado por muelle);
- 3 actuador de sobrecarga S1 movimiento de disparo en caso de sobrecarga;
- 4 leva diferencial;
- 5 contacto de disparo;
- S2 movimiento de disparo en caso de fallo de una fase;
- S3 apertura del contacto de disparo;

Como se muestra en la figura 3.21, una disposición de dos accionamientos consistente en un actuador de fallo de fase y otro de sobrecarga conforma la base del disparo diferencial. Durante el fallo de una fase, el bimetálico "muerto", que se enfría, empuja al actuador en sentido opuesto al del actuador de sobrecarga. Este movimiento recíproco se transforma en un movimiento adicional de disparo por medio de una leva diferencial.

Durante el fallo de una fase, la disposición de actuador doble provoca el disparo al 85% de la corriente de disparo con tres fases. Esto se refiere a la corriente que circula por el relé térmico. Cuando los motores se conmutan a triángulo y durante el fallo de una fase, las corrientes en el relé térmico y en el motor son diferentes. La distribución de corriente en el motor tampoco es constante, aunque sí depende de la carga.

La figura 3.22 muestra la curva característica típica de disparo de un relé térmico con y sin disparo diferencial en condiciones fría y caliente.

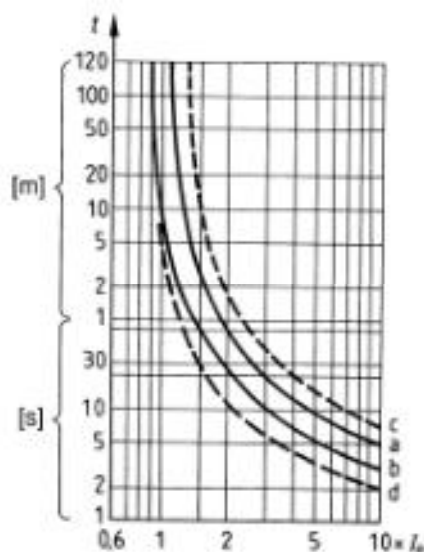


Fig. 3.22 Curva típica de disparo de un relé térmico.

Capítulo 3. Protección de motores .

En donde:

I_e corriente de disparo

T tiempo de disparo [s] segundos [m] minutos

En frío:

a carga simétrica 3 polos

b carga 2 polos con disparo diferencial

c carga 2 polos sin disparo diferencial

En caliente:

d carga simétrica 3 polos

Tiempo de recuperación

Después del disparo, los relés térmicos necesitan un periodo determinado de tiempo para que las tiras bimetalicas se enfríen de nuevo. Este periodo de tiempo se denomina tiempo de recuperación o de rearme. Sólo se podrá rearmar el relé cuando haya pasado dicho tiempo.

El tiempo de recuperación depende de la curva de disparo del relé térmico y de la magnitud de la corriente causante del disparo. En la figura 3.23 se muestran los valores medios del tiempo de recuperación de los relés térmicos. Puede verse que, a continuación de un disparo debido a una corriente 4 veces la de ajuste, el intervalo de recuperación es de 35 segundos aproximadamente.

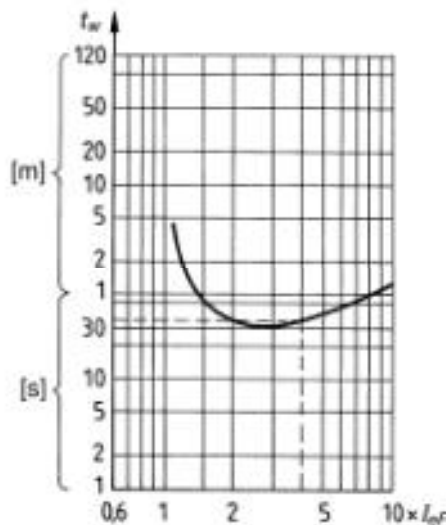


Fig. 3.23 Curva tiempo de recuperación.

En donde:

$I_e F$ corriente de ajuste

T_w tiempo de recuperación [s] segundos [m] minutos

El tiempo de recuperación también sirve como intervalo que permite el enfriamiento del motor durante esta pausa operacional. Sin embargo, este periodo de tiempo es insuficiente en la mayoría de los casos para permitir un re arranque.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido

Ajuste de la corriente

En general, el relé térmico ha de ajustarse a la corriente nominal ***I_e***. Los diales indicadores de la mayoría de los protectores poseen un margen de corriente para arranque directo y otro para arranque estrella - triángulo. Este último posee un factor de $1/\sqrt{3}$ incorporado internamente.

Si la temperatura del refrigerante excede los 40 °C, la potencia del motor ha de reducirse y el ajuste de corriente ha de adaptarse al relé térmico. Si el fabricante del motor no indica otra cosa, se aplica la tabla 11.

| Temperatura del refrigerante °C | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
|---|------|------|----|------|-----|------|-----|
| Factor de corrección <i>I_e</i> | 1.08 | 1.04 | 1 | 0.95 | 0.9 | 0.85 | 0.8 |

Tabla 11 Valores guía para los factores de corrección de ajuste de la corriente en relés térmicos para motores con desviación de la temperatura del refrigerante.

Para las instalaciones cuya altitud sea superior a 1000 metros sobre el nivel del mar, las cargas permisibles del motor decrecen y, por tanto, lo mismo sucede con los ajustes del relé térmico. Si el fabricante del motor no indica otra cosa, se aplica la tabla 12 Si se dieran desviaciones de la temperatura del refrigerante al mismo tiempo que la instalación a grandes alturas, se ha de considerar el producto de ambos factores a la hora de ajustar la corriente en el relé térmico.

| metros sobre el nivel del mar | salida nominal |
|-------------------------------|----------------|
| ≤ 1000 | 1 |
| ≥ 1500 | 0.97 |
| 2000 | 0.94 |
| 2500 | 0.9 |
| 3000 | 0.86 |
| 3500 | 0.82 |

Tabla 12 Valores guía para la corrección de la salida nominal con desviación en altitud de la instalación.

Mecanismo de Disparo Libre

El “Disparo Libre” se requiere por parte de IEC y de diversas regulaciones nacionales. El disparo también se llevará a cabo si se pulsa el botón de rearme o bien el “0” al mismo tiempo. El mecanismo de disparo se rearma pulsando la tecla de rearme una vez más.

En muchos relés térmicos, el mecanismo de disparo también funciona como rearme automático con la tecla de rearme bloqueada. Sólo es posible conectar de nuevo después de haber pulsado otra vez la tecla rearme.

Protección del motor durante el arranque con carga elevada

La corriente de arranque de un motor (***I_A***) 4 a 8 la corriente nominal (***I_e***) no depende de la carga, sino del diseño del motor. Sin embargo, el periodo de aceleración *t_A*, sí depende de la carga. De acuerdo con la figura 3.24, el término de arranque con carga elevada se utiliza si el periodo de aceleración depende de la corriente de arranque y es de algunos segundos. En estas condiciones, un relé térmico normal ha de soportar demasiadas tensiones térmicas y se dispara en la mayoría de los casos.

Capítulo 3. Protección de motores .

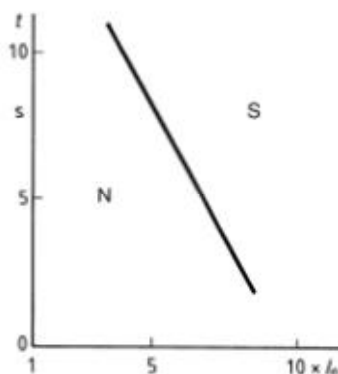


Fig. 3.24 Curva de arranque

En donde:

- T** periodo de aceleración
- I_n** corriente nominal
- N** condiciones normales de arranque
- S** arranque con carga elevada

Durante el arranque con carga elevada el periodo de aceleración es en función de la corriente, en estos casos, los elementos electrónicos de sobrecarga se pueden adaptar exactamente al arranque del motor con carga elevada. Así, en los circuitos temporales con relés térmicos, como los transductores de saturación, el puentado protector del relé durante el arranque y los relés térmicos separados para la fase de arranque, ya no son necesarios.

Protección de motores en recintos con riesgo de explosión

Los relés térmicos para la protección de motores EEx e han de cumplir las normas y regulaciones enumeradas. Los relés térmicos por sí mismos no están protegidos contra explosiones y, por lo tanto, no se deben instalar en áreas peligrosas.

En los países donde estén en vigor los requerimientos de prueba general, los protectores de motores EEx e se pueden utilizar si el tiempo tE del motor corresponde a los valores mínimos o es más largo. Si éste no es el caso el tiempo tE del motor ha de compararse con los valores de las curvas características de disparo en frío. La protección está garantizada si los valores corresponden, al menos, con la curva o, incluso, la sobrepasan.

Además, en el caso de motores en conexión triángulo, ha de comprobarse si el intervalo de disparo en el caso de disparo por dos polos corresponde a $0,87 \text{ veces } I_A/I_n \leq tE$.

Los elementos electrónicos de protección contra sobrecargas permiten ajustar exactamente el tiempo tE . Esto significa que durante un arranque con carga elevada, el tiempo tE permisible se puede emplear plenamente.

Protección electrónica de motores

Los elementos electrónicos de protección contra sobrecargas proporcionan la posibilidad de proyectar las condiciones térmicas del interior del motor para cada tipo de operación de forma mucho más precisa que, por ejemplo, con relés térmicos basados en bimetales. Al mismo tiempo, la información recientemente adquirida ayuda a extender el margen de aplicación del protector.

Las principales propiedades de los elementos electrónicos de protección contra sobrecargas son:

- Ajuste preciso de la corriente

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido

- Protección mejorada para las diferentes condiciones de arranque y trabajo
- Funciones extendidas de protección, comprobación, monitorización y control.

Protección contra sobrecargas

Modelos de simulación térmica

Con respecto a la precisión, en principio no es importante si los dispositivos están implementados sobre una base analógica o digital. Estos dispositivos, que están equipados con microprocesadores, también son parcialmente adecuados para comunicarse con sistemas de control de orden superior y son capaces, por ejemplo, de conectarse a sistemas de bus. Dependiendo de los requerimientos, los dispositivos se utilizan en la práctica de acuerdo con los siguientes modelos:

- **Modelo de un solo cuerpo:** sencillos elementos electrónicos de protección contra sobrecargas que simulan el calentamiento del motor únicamente en base a un modelo de un solo cuerpo. Sus curvas características de calentamiento y enfriamiento se pueden comparar con las condiciones de los relés térmicos. Sólo consideran la capacidad de calentamiento de los bobinados del estator y, por tanto, se enfrían demasiado rápidamente durante la parada del motor, puesto que el núcleo de hierro no se tiene en consideración. Por todo ello, el motor ha de protegerse por medio de sensores térmicos adicionales durante los cambios de carga y durante el funcionamiento intermitente.

- **Modelo de dos cuerpos:** complejos elementos electrónicos de protección contra sobrecargas que simulan el calentamiento del motor en base a un modelo de dos cuerpos. Su simulación se basa en la consideración del calentamiento de los bobinados del estator y de la masa de hierro del motor.

Esto ayuda, por ejemplo, a proyectar de forma precisa el calentamiento rápido del bobinado durante un arranque con carga elevada, así como también a la posterior transmisión de calor del bobinado del motor al hierro, el cual se calienta considerablemente más despacio. Durante el funcionamiento, también se introducen en el modelo simulado las pérdidas en el hierro, así como las pérdidas debidas a la asimetría. La consideración de la temperatura ambiente del motor incrementa la utilización máxima del sistema, incluso, durante grandes fluctuaciones de temperatura. Las diferentes condiciones de enfriamiento de un motor autoventilado durante el funcionamiento y la parada también se tienen en consideración por medio de dos constantes de tiempo diferentes. Asimismo, también se proyecta el rápido enfriamiento del bobinado después de la desconexión, hasta la temperatura del hierro y el posterior enfriamiento lento del motor en conjunto.

Esto significa que la proyección térmica del protector electrónico del motor se corresponde con la situación del mismo en todo momento. Esto permite la máxima utilización del sistema y garantiza la protección del motor segura, incluso, durante condiciones de arranque y funcionamiento difíciles.

La simulación de dos cuerpos puede explicarse utilizando la red de capacidad - resistencia, según se muestra en la figura 3.25.

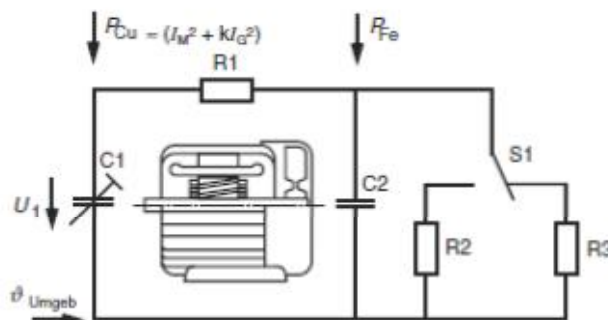


Fig. 3.25 Proyección de 2 cuerpos para simular el calentamiento del motor.

Capítulo 3. Protección de motores .

En donde:

C1 capacidad de acuerdo con la capacidad térmica del bobinado (ajustable);

C2 capacidad de acuerdo con la capacidad térmica del hierro y otras masas de la máquina;

R1 resistencia de acuerdo con la resistencia a la transmisión de calor entre el bobinado y el hierro;

R2 resistencia de acuerdo con las pérdidas de calor al ambiente durante una parada;

R3 resistencia de acuerdo con las pérdidas de calor al ambiente durante el funcionamiento;

PCu alimentación de corriente en proporción a las pérdidas en el cobre;

PFe alimentación de corriente en proporción a las pérdidas en el hierro;

S1 transición parada/arranque;

IM corriente del motor;

IG contra - componente causado por la asimetría;

vUmgeb consideración de la temperatura ambiente-/medio refrigerante con sensor Pt 100.

Ajuste de corriente

Observando la temperatura permisible para el funcionamiento continuo del motor nos cercioramos de que el periodo de vida del aislamiento está asegurado. Por esta razón, es muy importante el ajuste adecuado de la corriente. Si la corriente se ajusta a un valor muy elevado, en lo sucesivo no se podrá garantizar la protección de la máquina. El ajuste ha de reflejar los posibles factores que introducen desviaciones de las condiciones normales, como la temperatura del refrigerante muy alta, o bien, la instalación del motor en lugares por encima de 1000 metros del nivel del mar. Con los elementos electrónicos de protección contra sobrecargas, la corriente nominal se introduce directamente y de forma digital en Amperios. Si existen transformadores de corriente primaria pre conectados también se deberá tener en cuenta su relación de transformación.

El sistema en funcionamiento también está protegido si la menor corriente de trabajo requerida se introduce en el protector del motor, en vez del valor de corriente nominal. Una carga mayor, por ejemplo, la debida a fallos mecánicos, será detectada y se podrá detener el sistema mientras los daños sean pequeños.

Ajuste del tiempo de disparo

Al introducir el tiempo de disparo, las características de disparo del elemento electrónico de protección contra sobrecargas se adaptan a la capacidad térmica del motor. La introducción óptima del tiempo de disparo es posible si se conocen el bloqueo permisible del rotor en frío y su correspondiente corriente de bloqueo. Vea la figura 3.26 ambos valores pueden estar definidos por parte del fabricante del motor.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

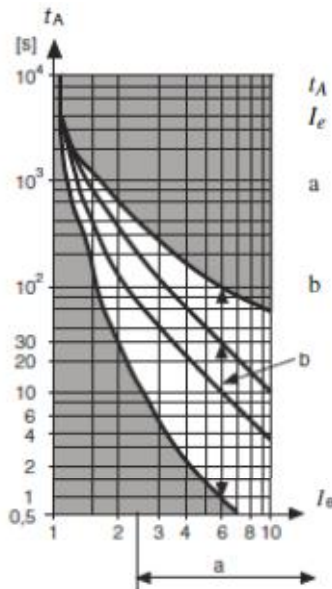


Fig. 3.26 Curva Tiempo-/Corriente de un elemento electrónico de protección contra sobrecargas (condiciones en frío).

En donde:

t_A Tiempo de disparo en segundos

I_e Corriente nominal de funcionamiento del motor $= I_e F$

a Rotor bloqueado o corriente máxima de arranque; margen de ajuste, ejemplo $I_a = 2.5$ a $12 I_e$

b Inercia; margen de ajuste con corriente de bloqueo ajustada adecuadamente, ejemplo $t_{IA} = 1$ a 600 segundos

En la mayoría de los casos el tiempo de bloqueo permisible es desconocido, pero si el motor ha sido adecuadamente dimensionado para la aplicación particular, se recomiendan los siguientes periodos de disparo:

- *Motores normales*: el ajuste normal es de 10 segundos
- *Motores especiales, como los dispositivos térmicamente rápidos*: se comienza con un ajuste inicial de prueba de 2 segundos, si se dispara la sobrecarga del motor, permitiendo que se enfríe, entonces se comienza de nuevo con 4seg y se incrementa el intervalo de disparo hasta lograr un arranque satisfactorio.

Funciones especiales de protección de motores

Fallo de fase

Los elementos electrónicos de protección contra sobrecargas pueden reconocer el fallo de una fase, independientemente de la carga, y pueden reaccionar inmediatamente.

Se utilizan diversas soluciones:

- **Disparo diferencial**: la curva de disparo se desplaza, de forma similar al relé térmico, por medio de un disparo electrónico diferencial. Si el motor no está a plena carga, puede seguir funcionando.

Capítulo 3. Protección de motores .

- **Corte rápido:** previene posteriores calentamientos innecesarios del motor y protege el motor y los cojinetes del sistema. El disparo se retrasa frecuentemente durante un corto periodo de tiempo para prevenir un corte innecesario en la red de suministro durante las interrupciones monofásicas de corta duración.

Asimetría

Las tensiones de fase asimétricas están originadas, principalmente, por líneas de suministro largas. La corriente asimétrica resultante en los bobinados del motor llega a ser, dependiendo del diseño del motor, de 6 a 10 veces la asimetría de tensión.

Los motores de tamaño intermedio y grande de baja tensión se sitúan en riesgo térmico rápidamente (motores de rotor crítico). Por esta razón, la carga ha de reducirse, para evitar el sobrecalentamiento del motor. Algunos dispositivos electrónicos de protección de motores detectan la asimetría y corrigen a la baja el límite de disparo. Sin embargo, en la práctica no siempre es posible reducir la carga del motor. No obstante, la sobrecarga puede emitir una señal de advertencia.

Con alimentación asimétrica, no sólo es un motor el afectado, sino el sistema entero. Es por esto recomendable controlar de forma centralizada la tensión de la red. En sistemas con una red “mala” con tensiones de la red normalmente asimétricas, los motores han de dimensionarse de acuerdo con ello para prevenir un efecto negativo en su periodo de vida.

Las asimetrías elevadas o el fallo de una fase pueden ser producidas por contactos defectuosos en los interruptores automáticos de potencia, los contactores, terminales, fusibles, así como también fallos internos del motor. La rápida detección y corte previene los daños por sobrecalentamiento en estos dispositivos. Se protege así al sistema y a los cojinetes del motor.

Definición de asimetría de tensión de acuerdo con NEMA e IEC:

$$\Delta U (\%) = \frac{\text{Máxima desviación de la tensión media en fases} \times 100}{\text{media de tensión en fases}}$$

Derivaciones a tierra

Los daños en el aislamiento de los motores frecuentemente se producen por los picos transitorios de alta tensión. Las causas son los relámpagos, conmutaciones de red, descargas de condensadores y dispositivos electrónicos de potencia. También pueden causar derivaciones el envejecimiento, las sobrecargas continuas o cíclicas, así como también las vibraciones mecánicas y los cuerpos extraños. La mayoría de los daños en el aislamiento ocasionan derivaciones hacia las partes de la máquina conectadas a tierra. En redes conectadas a tierra las corrientes hacia ella pueden alcanzar valores elevados. Dependiendo del tipo de red y de los requerimientos, las corrientes a tierra han de controlarse, bien utilizando el método “Holmgreen”, o bien por medio de un transformador sumador de corriente.

Derivaciones a tierra utilizando el método “Holmgreen” (para redes críticas con tierra)

Para detectar corrientes de derivación en redes críticas con tierra o con conexiones a tierra de baja resistencia, se miden las corrientes en los conductores de las tres fases. En un motor perfecto la suma de dichas corrientes ha de ser cero. Pero si hay circulación de corriente hacia la carcasa del motor y de ahí a tierra, aparece una corriente I_0 en el punto central de la estrella del transformador, la cual es proporcional a la corriente derivada a tierra. Ésta es percibida por el detector de derivaciones y provoca

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

el disparo. Hay un retraso corto que evita disparos erróneos debidos a la saturación transitoria del transformador, la cual puede aparecer en las operaciones de conmutación. Es necesario escoger una sensibilidad, de forma que, ni los errores de saturación del transformador ni las señales de interferencia en la conexión estrella - triángulo producidas por los terceros armónicos superiores, provoquen el disparo. Figura 3.27

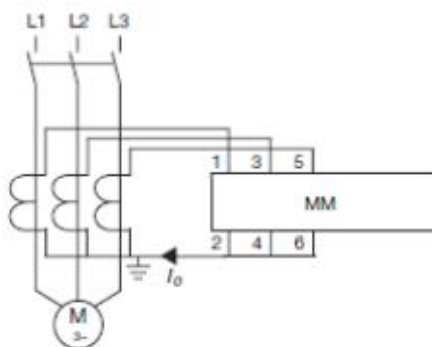


Fig. 3.27 Protección contra derivaciones a tierra utilizando el método "Holmgreen".

En donde:

T1 transformador principal de corriente

MM protector del motor

I_0 corriente residual (proporcional a la corriente derivada a tierra)

Derivaciones a tierra utilizando transformadores sumadores de corriente

En redes aisladas, compensadas o conectadas a tierra en alta impedancia, la elevada sensibilidad requerida se obtiene por medio de un transformador sumador de corriente, cuyo núcleo rodea los tres conductores que alimentan al motor. De acuerdo con el principio de conmutación del protector de corrientes derivadas, es posible la protección contra derivaciones a tierra. Si el umbral de respuesta es bajo, es suficiente un pequeño defecto de aislamiento para disparar un aviso de precaución o para la desconexión. Figura 3.28.

Aplicaciones

- Motores de media tensión
- sistemas en entornos problemáticos, por ejemplo, humedad, polvo, etc., en minas, canteras, fábricas de cemento, molinos, procesadoras de madera, plantas de bombeo, plantas depuradoras, drenajes

Capítulo 3. Protección de motores .

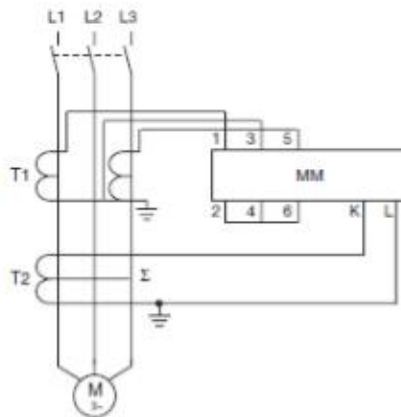


Fig. 3.28 Protección contra derivaciones a tierra utilizando un transformador acumulador de corriente

En donde:

- T1** transformador principal de corriente (detección de corriente en 2 fases)
- T2** transformador acumulador de corriente
- MM** protector de sobrecargas del motor

Funciones protectoras del sistema Bloqueos y sobrecargas elevadas

Durante sobrecargas intolerablemente elevadas y bloqueos, la desconexión inmediata del sistema evita esfuerzos mecánicos y térmicos innecesarios al motor y a los elementos transmisores de energía. Esto reduce los accidentes y las pérdidas de producción. Las sobrecargas de desarrollo lento se pueden detectar e informar de ellas muy prematuramente (ej. un cojinete defectuoso).

La función protectora se activa después de que el motor alcance el régimen de trabajo de forma satisfactoria, al llegar a la corriente nominal de trabajo. **Fig. 3.29.**

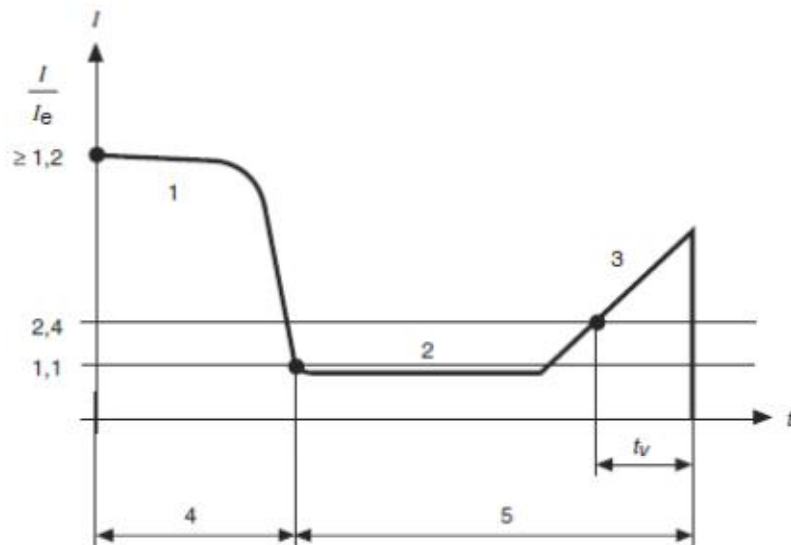


Fig. 3.29 Función protectora – sobrecargas elevadas y bloqueos.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

- 1 arranque del motor $I > 1,2 I_e$ / t_v retraso del disparo
- 2 funcionamiento nominal
- 3 sobrecargas elevadas y bloqueos
- 4 protección contra bloqueos inactiva
- 5 protección contra bloqueos activa (umbral de disparo)

Aplicaciones

- Sistemas de transporte
- Molinos
- Mezcladores
- Trituradores
- Sierras, etc.

Subcarga

Los motores cuya refrigeración depende del medio que ellos mismos bombean (ej. bombas sumergidas, ventiladores) pueden llegar a sobrecalentarse, aún con baja carga, si no hay medio que bombear o la cantidad del mismo es insuficiente (filtros obstruidos, compuertas cerradas). En muchos casos estas máquinas se utilizan en lugares difícilmente accesibles. Las consecuencias son los largos periodos de reparación y los costes correspondientemente elevados.

Si no se alcanza la corriente especificada, esto también puede indicar una avería mecánica en el sistema (cintas transportadoras rotas, aspas de ventilador defectuosas, acoplamientos defectuosos, ejes rotos o herramientas desgastadas).

Estas condiciones no suponen riesgo para el motor, pero conducen a pérdidas de producción. Su rápida detección ayuda a reducir los daños al mínimo.

Ha de ser posible retrasar la vigencia de la protección contra subcarga inmediatamente después de un arranque, con la idea de evitar un disparo en el intervalo en el que, por ejemplo, una compuerta o una válvula han de permanecer cerradas. **Fig. 3.30**

Aplicaciones

- bombas sumergidas
- ventiladores
- sistemas de transporte
- detección de fracturas en sistemas de transmisión mecánica

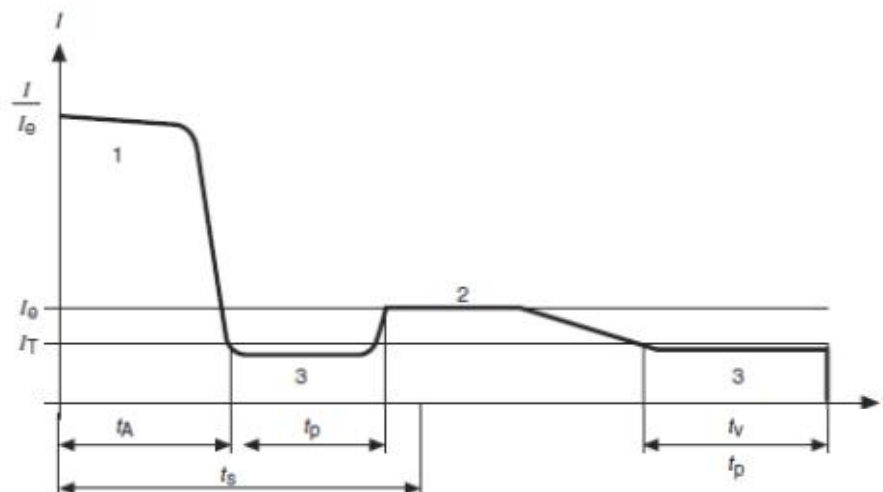


Fig. 3.30 Función de protección contra subcarga.

Capítulo 3. Protección de motores .

| | |
|-------|---|
| 1 | arranque |
| 2 | funcionamiento normal protección contra subcarga - inactiva |
| 3 | funcionamiento en subcarga |
| T_a | tiempo de arranque |
| I_T | umbral de disparo |
| t_s | retraso de la activación |
| t_v | retraso del disparo |
| t_P | alarma |

Protección contra la inversión de giro

La protección de rotación detecta la secuencia de fases en la red de inducción y se dispara si ésta es incorrecta.

Son posibles dos métodos diferentes:

- *control constante*: la tensión de red aplicada se controla constantemente. Si se detecta una secuencia incorrecta de las fases (sentido de rotación en la red de inducción) se evita el arranque del motor.
- *reacción sólo después del arranque*: el dispositivo de protección sólo reacciona después de que el motor ha arrancado y circula una corriente medible. Sin embargo con este método de los sistemas de respuesta rápida o de baja inercia podrían arrancar con la rotación incorrecta y sufrir daños.

6.6.3.4 Control del tiempo de arranque

Se controla el tiempo de arranque. Si el arranque no se ha llevado a cabo durante el intervalo de tiempo preseleccionado, el sistema puede desconectarse.

Este procedimiento de control es independiente de las condiciones térmicas del motor.

Aplicaciones

- Sistemas que requieran la detección de una carga incrementada o de un bloqueo del elemento motriz durante el arranque para evitar males mayores.

Posibles causas: sistemas sobrecargados, cojinetes o elementos de transmisión defectuosos. **Fig. 3.31**

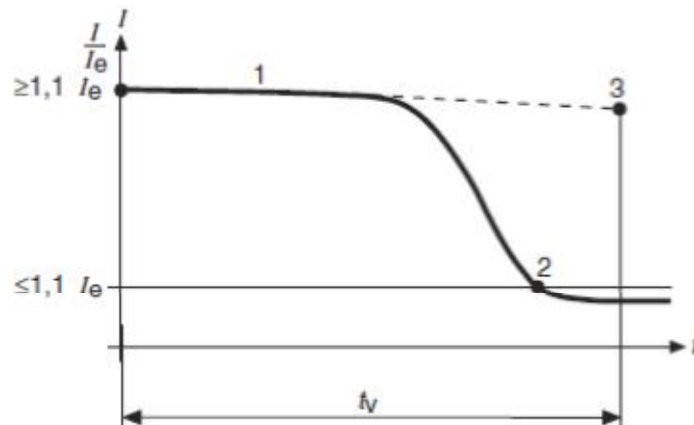


Fig. 3.31 Monitorización del intervalo de arranque.

| | |
|-------|---|
| 1 | arranque, corriente del motor $> 1,1 I_e$ |
| 2 | funcionamiento nominal |
| t_v | intervalo máximo de arranque |
| 3 | disparo si el intervalo de arranque se alarga |

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

Bloqueos durante el arranque

Si un dispositivo se bloquea durante la fase de arranque, el motor se calienta muy rápidamente y alcanza la temperatura límite del aislamiento, una vez agotado el periodo de bloqueo permisible. Los grandes motores de baja tensión y, sobre todo, los motores de media tensión en su mayoría poseen periodos de bloqueo permisible muy cortos, aunque permiten arranques considerablemente más largos. Para garantizar el arranque, es muy frecuente el tener que incrementar el periodo de bloqueo. Con la ayuda de un sensor externo de rotación o de parada, el elemento de protección detecta el bloqueo durante el arranque y desconecta el motor inmediatamente. Esto significa que el motor y el sistema de potencia no están sujetos a esfuerzos innecesarios durante un bloqueo. Durante el funcionamiento normal, las sobrecargas o los bloqueos se detectan utilizando la función "sobrecargas elevadas y bloqueos". Vea la Fig. 3.32.

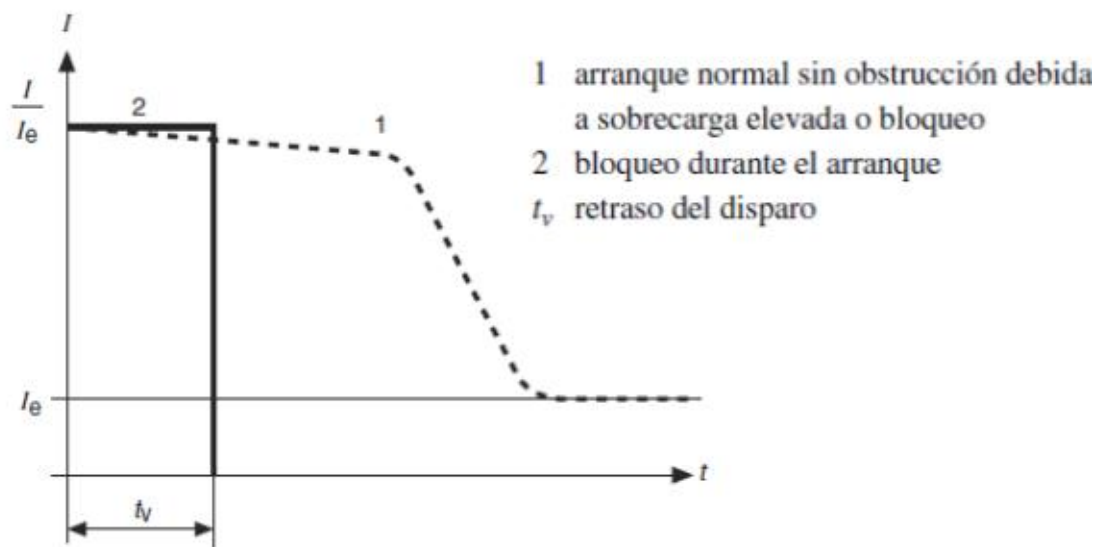


Fig. 3.32 Bloqueos durante el arranque.

Aplicaciones

- grandes motores de baja tensión
- molinos
- sierras
- motores de media tensión
- mezcladores
- grúas
- sistemas de transporte
- trituradores
- plataformas elevadoras

Funciones de control

Además de sus funciones protectoras, los elementos electrónicos de protección contra sobrecargas también desempeñan tareas de control y comunicación. En un sistema de control construido jerárquicamente, estos dispositivos se pueden combinar con el control manual o inmersos en la red.

En protectores de motores particularmente sensibles, los cuales implementan simulación de temperatura, por ejemplo, en base a un modelo de dos cuerpos, además de la corriente solicitada por el

Capítulo 3. Protección de motores .

motor, su carga térmica también puede ayudar a utilizar y controlar un proceso para su óptimo funcionamiento.

Avisos de precaución

Es muy frecuente el no desear detener un sistema de forma inmediata en el caso de que se produzca una situación inusual (que se desvía del estándar). Los avisos de precaución pueden ser útiles para reducir la carga, o bien, por ejemplo, permitir la corrección de un defecto a tierra sólo durante la próxima pausa operacional.

Hay que distinguir entre:

- *avisos de precaución dependientes de la corriente para:*
 - sobrecarga por debajo del umbral de bloqueo
 - subcarga
 - asimetría
 - defectos a tierra.
- *avisos de precaución dependientes de la temperatura para:*
 - nivel por debajo de la temperatura límite

Control de la carga

En el caso de molinos, trituradores de piedra, o sistemas de reparto se puede optimizar o controlar la carga del motor. Si el protector del motor copia con precisión la temperatura de éste, es posible ajustar el sistema a la temperatura máxima de funcionamiento, incluso, con cambios de carga. Esto permite la óptima utilización del sistema. El procedimiento de control se puede llevar a cabo de forma manual, basándose en los datos de calentamiento ofrecidos, o por medio de un mecanismo central de control.

Seguro de re-arranque

Los motores que han sido desconectados debido a un sobrecalentamiento sólo pueden ser arrancados de nuevo una vez que se hayan enfriado lo suficiente y el mando de restauración de la protección haya sido reseteado. Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que sólo una copia precisa del proceso de enfriamiento asegura que el motor no estará en situación de riesgo durante el próximo arranque.

Para asegurar el arranque de nuevo de un motor caliente a continuación de un corte, dicho motor ha de enfriarse hasta que posea la suficiente reserva térmica. La conexión mostrada en la **Fig. 3.33** previene intentos prematuros e insatisfactorios, así como esfuerzos adicionales del motor.

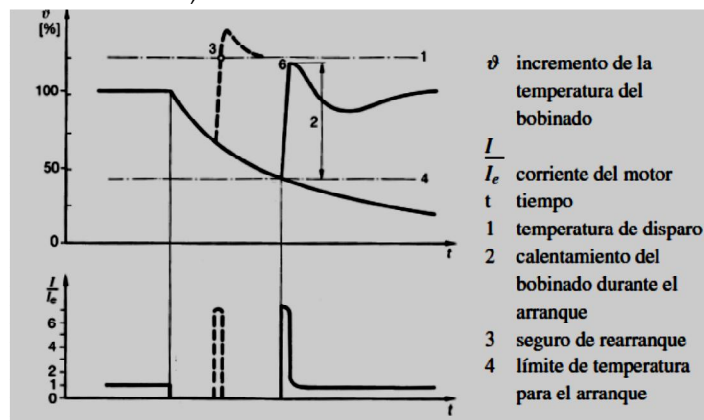


Fig. 3.33

Conmutación estrella - triángulo

Como la corriente del motor se mide continuamente, es posible controlar la conexión estrella - triángulo, independientemente de la carga, u optimizarla con respecto al tiempo. **Fig. 3.34**

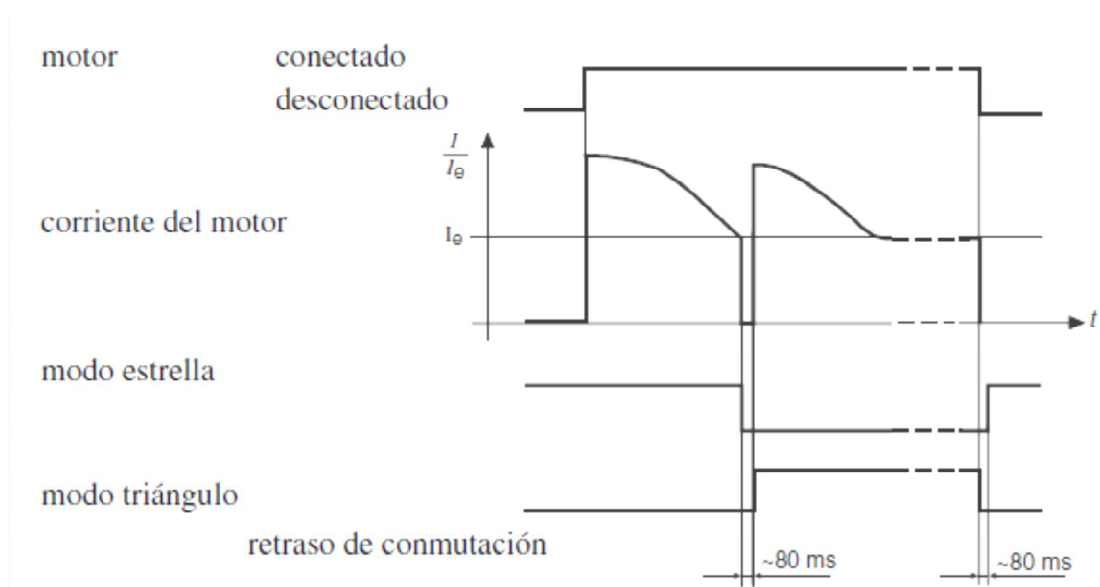


Fig. 3.34 Diagrama estrella triángulo.

Arranque en caliente

Los bobinados del motor se pueden calentar por encima de la temperatura límite permitida durante un intervalo de tiempo reducido. Esto es aplicable, en particular, a los motores de rotor crítico. La temperatura del rotor llega a 250 C, que es considerablemente mayor que la temperatura de funcionamiento continuo de 100...150 C, lo cual se permite durante corto periodo de tiempo.

Esto acarrea un periodo permisible de arranque del motor relativamente largo, el cual todavía está caliente por el trabajo anterior. En general, este periodo es sólo un poco más corto que el correspondiente al arranque en frío. Esta propiedad de un motor se puede utilizar para una sobrecarga del motor particularmente sensible sin afectar de forma adversa la reproducción correcta de la temperatura **Fig. 3.35**. La condición adicional "limitación del número de arranques" puede prevenir demasiados arranques en caliente.

Capítulo 3. Protección de motores .

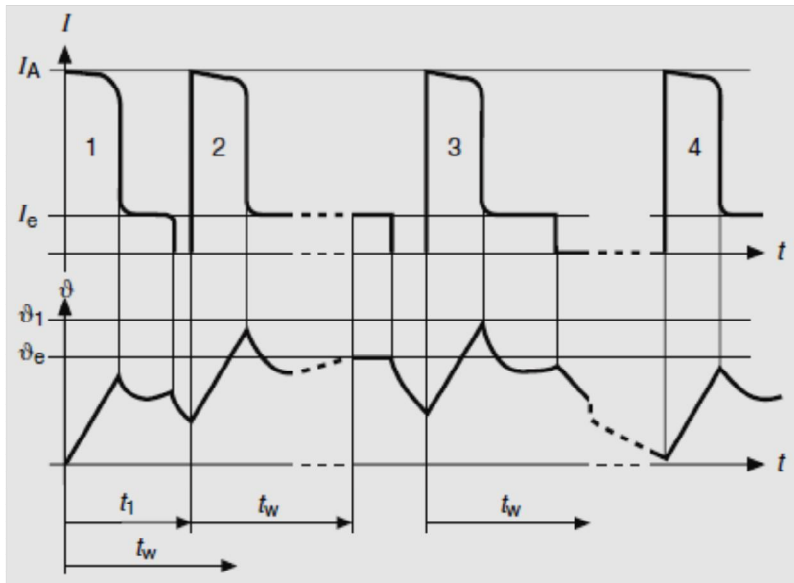


Fig. 3.35 Curvas de corriente y temperatura durante los arranques en frío y en caliente y umbrales de disparo (ej. SMM 825).

En donde:

I_A corriente de arranque

I_e corriente nominal

θ_e temperatura permisible del motor para el funcionamiento continuo y umbral normal de disparo para un protector de motor de funcionamiento continuo

θ_1 temperatura del motor, permisible durante un corto intervalo de tiempo, y umbral de disparo de Sobrecarga del motor con curva de disparo modificada para el arranque en caliente

1 Arranque (en frío)

2 Arranque en caliente

3 Arranque en caliente

4 arranque en frío (una vez frío el motor)

t_1 min. de tiempo antes de que el arranque en caliente 1. Sea posible ($t_1 > 10 t_6 I_e$)

t_w tiempo mínimo entre 2 arranques en caliente (4 .. 60 min)

Aplicaciones

Todos los sistemas que hayan de ser arrancados de nuevo inmediatamente y de forma segura después de una desconexión de la tensión.

• Procesos químicos y sistemas de producción, ej.

- mezcladores

- centrifugadores

- bombas

- sistemas de transporte

• Minas y túneles, ej.:

- ventiladores de aire fresco

- ascensores de pasajeros

- bombas de agua

• Suministro de aguas

• Drenajes

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

Posibilidades de comunicación

Los actuales protectores electrónicos de motores permiten procesar, guardar y acceder a todos los datos relevantes y estadísticos, utilizando tecnología basada en microprocesadores:

- Corriente de salida (motor)
- Asimetría
- Corriente a tierra
- Incremento de la temperatura
- Capacidad térmica
- Tiempo previsto hasta el disparo
- Periodo de operación
- Datos sobre las condiciones del contactor y del motor
- Causa y hora de anteriores avisos y disparos

Todos estos datos se pueden comunicar por medio del control central y del control de la consola del operador o por conexión a la red. También es posible adaptar continuamente los parámetros de trabajo almacenados en el protector del motor por medio de la red para requerimientos de proceso cambiantes.

Los protectores de motores de diseño modular poseen una conexión para los protocolos de bus más importantes.

Aplicaciones de los protectores electrónicos de motores

Motores de baja inercia térmica

Entre estos motores se encuentran, por ejemplo, los motores de bombas sumergibles, compresores herméticos para la producción de frío etc., que en la mayor parte de los casos están equipados con sistemas de enfriamiento altamente eficaces. Su periodo de bloqueo permisible normalmente es corto, debido a que los bobinados han sido diseñados para cargas específicas elevadas.

Estos dispositivos requieren que el tiempo de disparo se ajuste entre 2 y 4 segundos. La protección contra subcarga es particularmente útil para los motores de bombas sumergibles, puesto que no se refrigeran si el medio bombeado está ausente y, por tanto, se ponen en situación de riesgo térmico muy rápidamente.

Motores de elevada inercia térmica

Si se han de mover masas de gran inercia con largos periodos de arranque, como es el caso, por ejemplo, de ventiladores, centrifugadores, sistemas de mezclado etc., se utilizan con frecuencia motores con bobinados y jaulas sobredimensionadas.

La protección electrónica del motor es particularmente adecuada en estos dispositivos, puesto que este tipo de protección es capaz de copiar correctamente el incremento de temperatura durante el arranque. Para obtener un ajuste correcto, el intervalo de bloqueo permisible y la correspondiente corriente de bloqueo han de ser datos conocidos.

Motores rotor críticos

Los motores de media tensión y los grandes de baja tensión son, en la mayoría de los casos, motores de rotor crítico. Los intervalos permisibles de arranque y bloqueo están limitados por la capacidad térmica del rotor y vienen especificados por el fabricante del motor. Si el tiempo de disparo del protector del

Capítulo 3. Protección de motores .

motor se ajusta a un intervalo de bloqueo permisible, entonces la proyección térmica refleja los requerimientos prácticos del motor.

Las altas temperaturas son permisibles en el rotor durante un corto intervalo de tiempo. Por esta razón, el motor está sobre protegido en el arranque en caliente.

Si los motores de rotor crítico se utilizan bajo condiciones de elevada carga durante el arranque, se ha de tener en cuenta que alcanzarán su temperatura crítica muy rápidamente durante el bloqueo. Por ello, el periodo de arranque con carga elevada ha de ajustarse a un valor considerablemente más elevado que el intervalo de bloqueo permisible. Para garantizar la protección contra bloqueo durante el arranque, incluso en esas condiciones, se ha de controlar la velocidad durante el tiempo de arranque por medio de un cuentarrevoluciones. Durante el funcionamiento, el protector también ha de reaccionar inmediatamente a la condición de bloqueo.

Motores de media tensión

Los motores de media tensión se utilizan para potencias de salida de 200 kW en adelante, Aproximadamente. Su estructura y función son las mismas que las de los motores de baja tensión. En general, son rotores críticos y han de protegerse de acuerdo con dicha característica.

Motores controlados por frecuencia

Ha de tenerse muy presente que la refrigeración de los motores autoventilados no está plenamente garantizada a baja velocidad. El incremento de la temperatura del motor no sólo depende de la corriente consumida por éste. Vea la Fig. 3.36. Existen pérdidas adicionales del 10%, aproximadamente, debido a los armónicos.

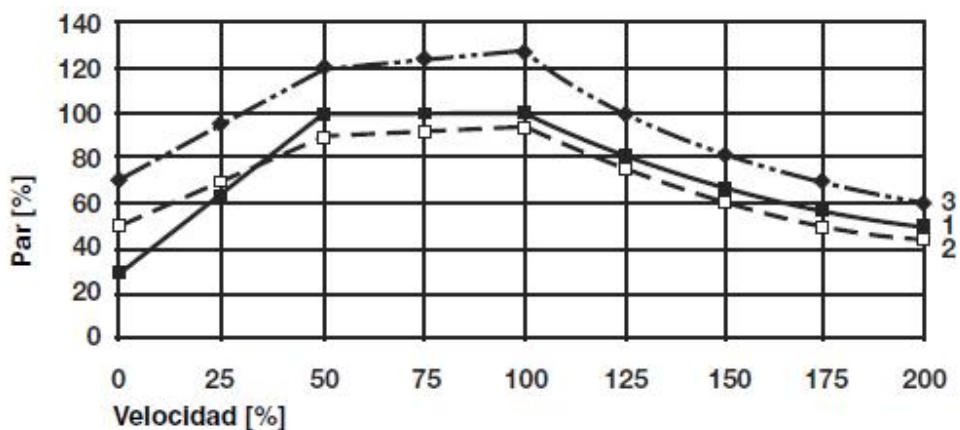


Fig. 3.36 Carga térmica continua permisible para un motor de inducción controlado por un dispositivo de velocidad variable.

En donde:

1 par de carga

2 par de un motor estándar con la carga continua permisible

3 par de un motor estándar de la potencia inmediatamente superior

Por esta razón, estos motores también han de estar equipados con sensores de temperatura, p.ej. sensores PTC.

La protección dependiente de la corriente puede estar ya incluida en el convertidor estático, o puede lograrse, independientemente de la frecuencia, por medio de dispositivos externos:

- Relé térmico basado en principios bimetálicos
- Interruptor automático de potencia

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

- Protectores automáticos de motores con protección PTC integrada

El margen de frecuencias permisible, así como la influencia de las elevadas frecuencias de conmutación utilizadas en el convertidor de frecuencia, han de tenerse en consideración al elegir un tipo particular de protector.

Arranque y parada suaves

No todos los elementos de protección de motores son adecuados para proteger motores activados por medio de elementos de arranque suave o estático basados en regulación de tensión. Durante el arranque, se dan corrientes que se desvían considerablemente de la forma sinusoidal y que pueden obstruir ciertas funciones de protección. Por esta razón, en los dispositivos básicos de sobrecarga, las funciones afectadas se han de desactivar durante las fases de arranque y parada suaves.

Si el arrancador estático también está equipado con la función de frenado, el protector contra sobrecargas ha de ignorar la asimetría que se da durante la fase de frenado.

Si los motores han de trabajar con tensión reducida durante un largo periodo de tiempo, han de protegerse adicionalmente por medio de sensores de temperatura (p. ej. PTC).

Motores con ventilación forzada

La refrigeración de los motores ventilados exteriormente no depende de la velocidad del motor. Estos elementos se ventilan durante un cierto periodo de tiempo posterior a su parada. El rápido enfriamiento del motor se puede tener en consideración en el protector electrónico de sobrecargas.

Incremento de la temperatura ambiente

Si la temperatura de refrigeración es superior a 40 C, la máquina ha de funcionar sólo con potencia reducida. Este problema también puede darse a temperaturas ambientales normales si ésta se incrementa drásticamente, p. ej., a causa de la luz solar o de otras fuentes caloríficas.

En principio, este problema ha de tenerse en cuenta durante la planificación. El elemento motriz ha de dimensionarse adecuadamente, o bien, ha de elegirse una clase de aislamiento superior y el protector de sobrecargas ha de adaptarse a dichas condiciones. Ciertas aplicaciones tienen en cuenta deliberadamente la correspondiente reducción del periodo de vida.

Para el incremento de la temperatura ambiente existen las siguientes soluciones comunes:

- Corregir las características de disparo del protector de sobrecargas del motor, así como la carga del sistema, de acuerdo con la temperatura ambiente. Los protectores particularmente sensibles tienen en cuenta la temperatura ambiente de forma automática en el modelo de simulación de temperatura por medio de los sensores de temperatura, p. ej. PT100.
- Corregir el ajuste de corriente: por medio de un termostato se conmuta el ajuste de corriente del protector de sobrecargas del motor a valores preseleccionados de acuerdo con la temperatura ambiente. Esto es posible para protectores de sobrecargas diseñados para motores de dos etapas con dos ajustes de corriente activables. Al mismo tiempo, el termostato también puede controlar la carga del dispositivo.

Selección del protector de motor contra sobrecargas adecuado

El concepto de protección económica de un motor requiere que el protector de sobrecarga se adapte a los requerimientos del motor y del sistema en el que ha de trabajar.

No es factible el proteger un sistema no crítico con dispositivos de alta calidad.

Capítulo 3. Protección de motores .

Por otra parte, y en cualquier caso, los daños pueden ser considerables si una parte importante de la planta de producción con condiciones difíciles de arranque y trabajo no se encuentra adecuadamente Monitorizada y protegida.

Las tablas siguientes han de simplificar la elección adecuada del dispositivo o la combinación de diversos elementos. Todos los criterios relevantes han de considerarse y tenerse en cuenta de nuevo para cada aplicación.

Los principales criterios de selección son:

- aplicación
- tipo de dispositivo y tamaño del motor
- condiciones ambientales
- requerimientos de control del motor

Selección del protector dependiendo de las condiciones ambientales

| Condiciones ambientales | | | | | | |
|--------------------------------|-------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------|---|--|
| Humedad | Poivo | Altas temperaturas | Grandes fluctuaciones de temperatura | Sin requerimientos específicos | | |
| | | | | | | Función de protección |
| | | ● | ● | ● | | Sensor de temperatura PTC en el bobinado |
| | | ● | ● | ● | | Sensor de temperatura PT 100 en el bobinado |
| | | ○ | ● | ● | | Temperatura ambiental considerada térmicamente |
| | ● | ○ | | | | Conexión a tierra por el método "Holmgreen" |
| | ● | ○ | | | | Conexión a tierra con transformador sumador de corriente |
| | | | | | | |
| | | | | | | Requerimientos de protección |
| | | | | | | del motor, dispositivos adecuados |
| | | ◆ | ◆ | ◇ | ◆ | Bajo: Bul. 140 (+ Bul. 817) |
| | | ◆ | ◇ | ◇ | ◆ | Bajo: 193-EA (+ Bul. 817) |
| | | ◆ | ◇ | ◇ | ◆ | Medio: CEFB 1; 193-EB (+ Bul. 817) |
| | ◇ | ◆ | ◇ | ◇ | ◆ | Medio: SMP 3 (+ Bul. 817) |
| | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | Alto: SMM 825 |

Funciones de protección

○ = Posible

● = Típica

Protección del motor

◇ = Posible solución

◆ = Solución óptima

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

Selección del protector de sobrecarga dependiente de la aplicación

| Aplicación | Cizallas | Prensas | Trituradores | Molinos | Elevadores | Grúas | Cintas transportadoras | Ventiladores | Compresores de refrigeración | Compresores | Bombas hidráulicas | Bombas sumergibles | Bombas | |
|---|----------|---------|--------------|---------|------------|-------|------------------------|--------------|------------------------------|-------------|--------------------|--------------------|--------|--|
| Comportamiento Operacional Típico | | | | | | | | | | | | | | |
| | ● | ● | | | ● | ● | ● | | | ● | ● | | ● | Arranque normal |
| | | | ● | ● | | | ○ | ● | | | | | | Arranque con carga elevada |
| | | | | | | | | | ● | | | ● | | Arranque corto |
| | | | | ○ | | ● | ○ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | Carga continua |
| | | | ● | ● | | | ● | | | | | | | Carga cambiante |
| | ● | ● | | | ● | ● | ○ | | ○ | ○ | | | ○ | Operación de arranque - parada |
| | ● | ● | ● | ○ | | ○ | | | | | | | | Sobrecarga permisible de corta duración |
| Fallos típicos/requerimientos de protección | | | | | | | | | | | | | | |
| | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | ● | ○ | ● | ● | ● | ● | ○ | Tiempo de arranque muy largo |
| | ○ | ○ | ● | ● | ● | ● | ● | ○ | ● | ● | ○ | ○ | ● | Bloqueo durante el arranque |
| | ● | ● | ● | ● | | ○ | ● | | | | | | | Sobrecarga elevada durante el funcionamiento |
| | ● | ● | ● | ● | ● | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ● | Bloqueo durante el funcionamiento |
| | | | ○ | | ○ | ○ | ● | ● | | | | ● | | Subcarga |
| | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | Conexión a tierra por el método "Holmgreen" |
| | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Conexión a tierra con transformador sumador de corriente |
| | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | Fallo de fases |
| | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Asimetría |
| | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ○ | | | | | | Asimetría considerada térmicamente |
| | ○ | ○ | ● | ● | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Sensor de temperatura PTC en el bobinado |
| | ○ | ○ | ● | ● | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Sensor de temperatura PT 100 en el bobinado |
| Requisitos de protección del motor, dispositivos adecuados | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | ◇ | ◇ | | ◆ | Baja: Bul 140 (+ Bul 817) |
| | | | | | | | | | | ◇ | ◇ | | ◆ | Baja: 193EA (+ Bul 817) |
| | ◇ | ◇ | | | ◇ | ◇ | ◇ | ◇ | ◇ | ◆ | ◆ | ◇ | ◇ | Media: CEFB 1; 193EB (+ Bul. 817) |
| | ◆ | ◆ | | | ◇ | ◇ | ◇ | ◇ | ◇ | ◆ | ◆ | ◇ | ◇ | Media: SMP-3 (+ Bul. 817) |
| | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◇ | Alta: SMM 825 |

Comportamiento operacional típico /fallos típicos / requerimientos de protección

○ = Posible
● = Típico

Protección del motor

◇ = Solución posible
◆ = Solución óptima

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

Selección de la protección de acuerdo con los criterios de control de motores

| Funciones MCC | Resonancia | Motor de esc. corriente | Diagnóstico | Comunicación | Pantalla, dispositivo | Estadísticas | Comunicación | Pantalla, dispositivo | Avisos | Comunicación | Presentación en dispositivo | Datos operacionales | Con comunicación | Con relé de detección |
|---------------|------------|-------------------------|-------------|--------------|-----------------------|--------------|--------------|-----------------------|--------|--------------|-----------------------------|---------------------|------------------|--|
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | Funciones de aviso útiles |
| | | | | | | | | | ● | ● | ● | ● | ● | Tiempo de arranque excesivo |
| | | | | | | | | | ● | ● | ● | ● | ● | Sobrecarga elevada durante el funcionamiento |
| | | | | | | | | | ● | ● | ● | ● | ● | Conexión a tierra con transformador sumador de corriente |
| | | | | | | | | | ● | ● | ● | ● | ● | Asimetría |
| | | | | | | | | | ● | ● | ● | ● | ● | Sensor de temperatura PT 100 en el bobinado |
| | | | | | | | | | | | | | | Datos operacionales de utilidad |
| | | | | | | | | | ● | ● | ● | ● | ● | Corriente del motor |
| | | | | | | | | | ● | ● | ● | ● | ● | Asimetría |
| | | | | | | | | | ● | ● | ● | ● | ● | Corriente a tierra |
| | | | | | | | | | ● | ● | ● | ● | ● | Incremento de temperatura |
| | | | | | | | | | ● | ● | ● | ● | ● | Temperatura del estator |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | Requerimientos de |
| | | | | | | | | | | | | | | Control de motor, dispositivos adecuados |
| | ◆ | ◆ | | | | | | | | | | | | Bajo: Bul 140 + Intertaz E/S |
| | ◆ | ◆ | | | | | | | | | | | | Bajo: 193-EA/EB, + Intertaz E/S |
| | | | ◇ | | | | ◇ | | | | | ◇ | | Medio: SMP 3 |
| | ◆ | ◆ | ◇ | | | | ◇ | | | | | ◇ | | Medio: SMP 3 + Intertaz E/S |
| | | | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | Alto: SMM 825 |
| | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | ◆ | Alto: SMM 825 + Intertaz E/S |

Funciones útiles de protección y datos operacionales

○ = Posible
● = Típica

Control de motor

◇ = Posible solución
◆ = Solución óptima

Capítulo 4. Métodos de arranque

4.1 Arrancadores de control mecánico

Con el tiempo se ha desarrollado varios métodos de arranque electromecánico desde un simple desconectador (switch) hasta la combinación de varios elementos para proteger tanto al operador como al motor, de los cuales nada más vamos a estudiar los más importantes al día de hoy.

4.1.1 Arranque de motor directo

El arranque de motor directo es el método más sencillo para arrancar un motor trifásico asíncrono. Los devanados del estator están conectados directamente a la red eléctrica por un proceso de conmutación simple. **Figura 4.1**

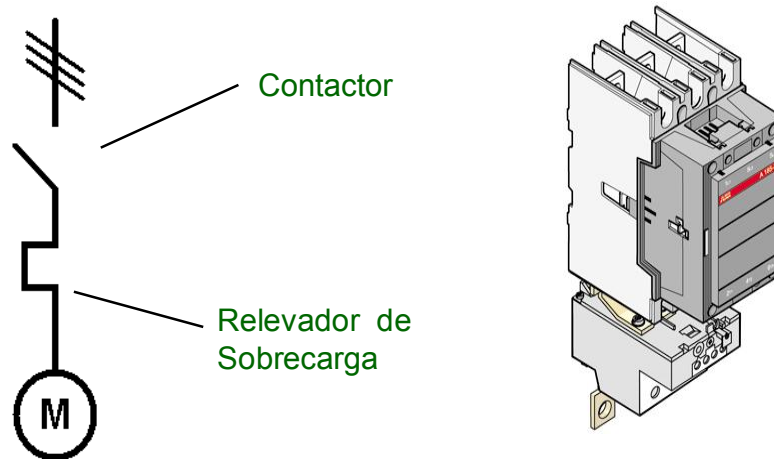


Fig. 4.1 Arreglo arranque a tensión plena

Como resultado de esta aplicación obtendremos altas corrientes de arranque (corriente de sobrecarga) que a su vez causan molestas caídas en la tensión de red. Por este motivo, las compañías eléctricas suelen limitar la potencia nominal de los motores conectados a la red. Este valor límite puede variar de una red a otra. En redes eléctricas públicas, estas limitaciones por lo general se cumplen cuando en el arranque la potencia aparente del motor trifásico no excede de 5.2kVA o cuando es de mayor potencia aparente pero la corriente de arranque no excede de 60 A. Con una tensión de red de 400 V y un arranque 8 veces la intensidad nominal, esto corresponde a un motor con una intensidad nominal de 7.5 A o un motor de 4kW.

En motores que ocasionalmente sobrepasan los 60 A de corriente de arranque y motores con una intensidad de arranque de más de 30 A que causan alteraciones en la red pública, ej. Por arranques pesados, alta frecuencia de conmutación o variación en el consumo (ascensores, sierras de corte), se deben tomar medidas alternativas para las variaciones disruptivas de tensión. Los motores con potencias de más de 4 kW y tensiones nominales de 400/690 V pueden arrancarse usando una configuración estrella-triángulo.

El arranque directo crea un estrés térmico en los devanados del motor y, solo brevemente, fuerzas electrodinámicas momentáneas. Con frecuencia, el arranque directo reduce la vida de los devanados de

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

un motor estándar (p.ej. Operaciones periódicas intermitentes). El bloqueo del rotor (rotor bloqueado) es un fallo grave que puede llevar a la destrucción térmica del motor trifásico asíncrono. Cada devanado del motor debe estar protegido por un dispositivo de protección para evitar que ocurran este tipo de sobrecargas térmicas. Una solución económica es el uso de relés de sobrecarga, más conocidos como relés térmicos o relés bimetálicos.

Estos relés de sobrecarga se conocen como interruptores protectores de motor en combinación con un módulo de conexión. En la alimentación del motor, este protege la conmutación (contactor), la acometida y los devanados del motor contra su destrucción debido a una sobrecarga térmica (rotor bloqueado) y cortocircuito, aun cuando tengamos una pérdida de fase (L1, L2, L3). Para este propósito, debemos establecer en el interruptor protector de motor la corriente nominal del motor y los cables de conexión deben de estar calculados para este valor.

El diseño de los componentes en el circuito principal del motor se lleva a cabo de acuerdo con la intensidad nominal (I_e) del motor y la categoría de empleo AC-3 (Norma IEC/EN60947-4-1), AC-3 = motores de jaula de ardilla: arranque, paro durante la operación. La selección de un interruptor protector adecuado es decisiva para la seguridad del funcionamiento y de la vida útil del motor.

Características

- Altas corrientes de arranque $7 * I_{nom}$. **Fig. 4.2**
- Nivel de torque elevado (desgaste mecánico)
- Tiempo de arranque muy corto
- Siempre es un paro directo
- Solución económica

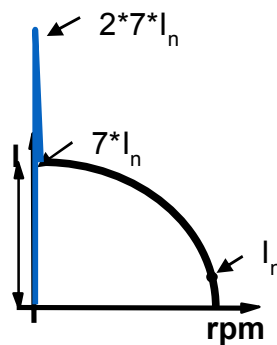


Fig. 4.2 Curva de arranque a tensión plena

4.1.2 Arranque estrella delta

Con un arranque de motor estrella-triángulo, la puesta en marcha del motor trifásico asíncrono se realiza mediante una transición entre los devanados. Los puentes en la caja de bornes del motor se omiten, y las 6 conexiones de los devanados se conectarán a la red eléctrica mediante una conmutación llamada estrella-triángulo (conmutación manual o automática de los contactores). Durante el funcionamiento, los devanados del motor están conectados en triángulo. El voltaje del devanado (U_w), por lo tanto debe ser

Capítulo 4. Métodos de arranque

igual a la tensión de fase (LSN) del sistema trifásico. Por ejemplo, en una tensión de red de 3 AC 400 V, el voltaje en la placa de características del motor debe estar especificado como 400/690 V.

En una conexión en estrella, la tensión de red (LSN) de los devanados individuales del motor se reduce por un factor de $1/\sqrt{3}$ ($\sim 0,58$). Por ejemplo: $400 \text{ V} \cdot 1/\sqrt{3} = 230 \text{ V}$. El par de arranque y la corriente de entrada (en la conexión en estrella) se reduce a un tercio de los valores de la conexión en triángulo. Corriente de arranque típica: $2 \dots 2.5 I_e$. Debido a la reducción del par en el arranque, la configuración en estrella-triángulo sólo es adecuada para aparatos con un par de carga baja o un par de carga (ML) que aumenta con la velocidad, como es el caso de bombas y ventiladores (ventiladores / extractores). También se utilizan en unidades que solo están sujetas a una carga después de haber acelerado de velocidad, por ejemplo, con prensas y centrífugas.

Con el cambio de configuración de estrella a triángulo, la corriente cae a cero, y la velocidad del motor se reduce en función de la carga. El paso a triángulo provoca un aumento espectacular de la corriente, así como la aplicación de toda la tensión de red en los devanados del motor. Esto provocará caídas de tensión en sistemas de suministro de red poco fiables o débiles. El par motor también sube a un valor más alto durante la transición, lo que causa una carga adicional sobre todo el sistema. Si, por ejemplo, las bombas funcionan con arrancadores estrella-triángulo, a menudo se utiliza un freno mecánico para proporcionar una amortiguación en el sistema y evitar los llamados "golpes de ariete".

La transición automática de estrella a triángulo generalmente se realiza mediante un relé temporizador en el contactor de línea. El tiempo requerido para el arranque en estrella depende de la carga del motor y debe continuar hasta que el motor haya alcanzado cerca del 75 al 80% de su velocidad de funcionamiento (n_N) para garantizar la post-aceleración necesaria para el cambio a triángulo. Esta post-aceleración de la configuración en triángulo está asociada con altas corrientes como en el caso del arranque directo.

Una conmutación demasiado rápida entre la estrella y el triángulo puede dar lugar a la desconexión del arco (en los contactos de los contactores) y puede causar un corto circuito. El intervalo de tiempo de transición debe ser tal, que sea suficiente para eliminar los arcos. Al mismo tiempo, la velocidad de la unidad se debe reducir lo menos posible. Existen relés temporizadores especiales para cumplir con la transición estrella-triángulo.

La secuencia de fases correcta (ver diagrama de conexión del motor) para el paso de estrella a triángulo se debe tener en cuenta al conectar los conductores del motor y el arrancador. Debe considerarse la dirección de funcionamiento del motor. Una conexión incorrecta de las fases puede provocar altas corrientes de pico en el arranque, a causa de la ligera disminución en la velocidad durante el intervalo del cambio. Los picos de corriente ponen en peligro los bobinados del motor y los contactos de conmutación innecesariamente. Cuando arrancamos con la conexión en estrella, en primer lugar el contactor de estrella puentea los terminales U2, V2, W2. A continuación, el contactor principal aplica la tensión de red (ULN) en los terminales U1, V1, W1. Después de transcurrir el tiempo programado, el relé temporizador desconecta el contactor de estrella y conecta el contactor de triángulo aplicando la tensión de red a los terminales U2, V2 y W2.

La elección de los componentes para la conexión del motor se lleva a cabo en concordancia con la corriente de funcionamiento, es decir, del motor y con la categoría de empleo AC-3 (Norma IEC/EN60947-4-1), AC-3 = motores de jaula de ardilla: arranque, paro durante la operación. El relé térmico se colocará aguas abajo del contactor principal. Estableceremos por tanto un factor de corriente $1/\sqrt{3}$ ($\sim 0,58 \cdot I_e$) por debajo de la corriente nominal del motor. El contactor principal y el de triángulo también se seleccionan con este factor de reducción ($\sim 0,58 \cdot I_e$). El contactor estrella para un arranque de no más de 15 segundos debe seleccionarse con un factor de un tercio ($\sim 0,33 \cdot I_e$) de la corriente nominal del motor. En tiempos de arranque ($>15\text{s}$) de hasta 60 segundos, el contactor de estrella debe seleccionarse de la misma magnitud que el contactor principal. **Fig.4.3**

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado solido .

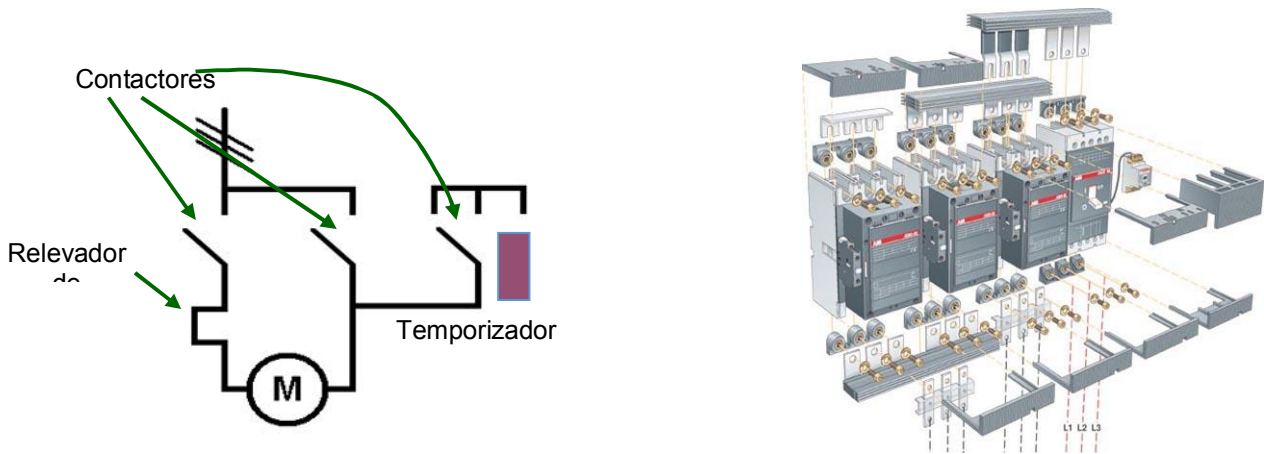


Fig. 4.3 componentes arrancador estrella triangulo

Características

- Baja corriente de arranque (solo al arranque). **Fig. 4.4**
- Transmisión de picos al mover la carga
- Bajo torque de arranque (demasiado bajo)
- Tiempo de arranque largo
- Muchos elementos por cablear
- Doble cableado al motor

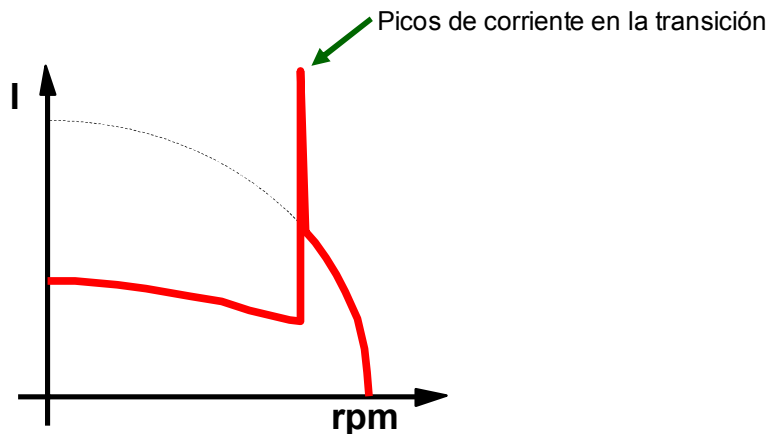


Fig. 4.4 Curva de arranque estrella-triangulo

4.1.3 Arranque con autotransformador

Este sistema de arranque consiste en alimentar el motor a tensión reducida a través de un autotransformador, de forma que las sucesivas tensiones aplicadas en bornes del motor tengan un valor

Capítulo 4. Métodos de arranque

creciente durante el periodo de arranque, hasta alcanzar el valor de la tensión nominal de línea, obteniéndose de esta forma una reducción de la corriente de arranque y del par motor, en la misma proporción. Fig. 4.5

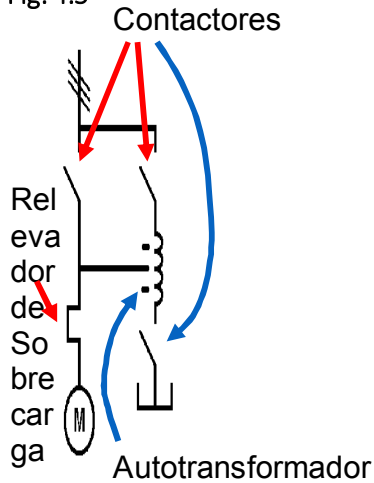


Fig. 4.5 Diagrama Autotransfor,ador

Por lo general los autotransformadores se equipan con tomas para el 55 %, 65 % y 80 % de la tensión de línea. El número de puntos de arranque depende de la potencia del motor y de las características de la máquina accionada. No se producen cortes de tensión en la alimentación del motor.

La característica más interesante de este sistema de arranque es la reducción de la corriente de arranque, entre 1.7 y 4 la Intensidad nominal, , aunque debe temerse en cuenta también la reducción del par de arranque, entre 0.4 y 0.85 el par nominal, ya que éste debe resultar suficiente para acelerar la máquina accionada, hasta la velocidad nominal. Este tipo de arranque está indicado para máquinas de potencia elevada o de fuerte inercia donde sea fundamental reducir las puntas de intensidad en el arranque.

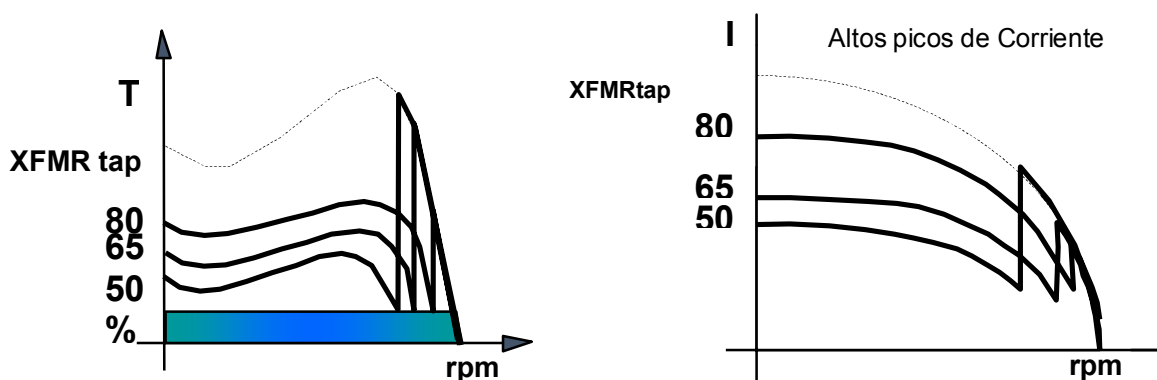


Fig. 4.6 Relación Torque corriente

4.2 Arrancadores de Estado Sólido

4.2.1 Arrancador suave

En muchos casos, el arranque directo o el arranque estrella-triángulo del motor trifásico asíncrono no es la mejor solución ya que altas corrientes de pico pueden influir en el suministro eléctrico y un aumento repentino del par puede inducir a los componentes mecánicos de la máquina o al sistema a altos niveles de estrés.

El arrancador suave proporciona un remedio. Permite un aumento continuo y lineal del par y ofrece la posibilidad de una reducción selectiva de la corriente de arranque. La tensión del motor se incrementa a partir de una tensión inicial y un tiempo de rampa de aceleración, seleccionados mediante selectores hasta llegar a la tensión nominal del motor. El arrancador también puede controlar la rampa de parada mediante la reducción de la tensión.

La curva característica del motor asíncrono trifásico sólo se aplica cuando la tensión del motor es igual a la tensión de red (ULN). Si aplicamos una tensión inferior, obtendremos una reducción cuadrática en el par ($M \sim U^2$). Cuando lo comparamos, por ejemplo, con un arranque estrella-triángulo, la tensión del motor se reduce hasta el 58% ($\sim 1/\sqrt{3}$), y el par se reduce a alrededor del 33% (un tercio)

La diferencia entre las características de la carga (ML) y las características del par motor (MM), y por consiguiente la fuerza de aceleración, puede estar influida por medio del ajuste del voltaje del motor. El arrancador debería ser preferido para todas las aplicaciones con un arranque con carga (la carga no se puede conectar después de la puesta en marcha) que la configuración estrella-triángulo. Es una buena alternativa a la configuración en estrella-triángulo por razones económicas y también por razones de ahorro de energía, en particular para unidades de alta potencia.

La tensión del motor en un arrancador se modifica por el control del ángulo de cada fase en media onda sinusoidal. Con este fin, dos tiristores en cada una de las fases están conectados en antiparalelo, uno de ellos para la media onda positiva y el otro para la media onda negativa. **Fig. 4.7**

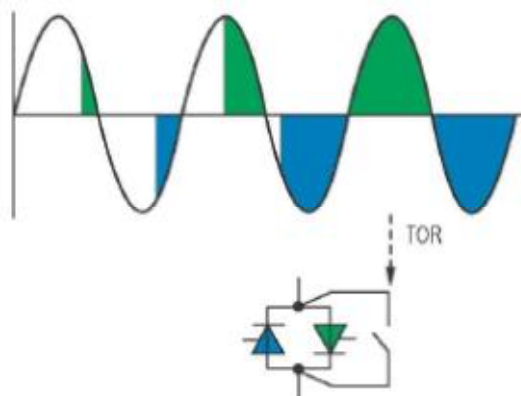


Fig. 4.7 Funcionamiento de los tiristores

Control del ángulo de fase y contacto de By pass

Cuando la rampa de aceleración (t_{Start}) ha finalizado, los tiristores están completamente controlados (media onda sinusoidal completa => fin de rampa: TOR). Como los tiristores sólo están activos durante la

Capítulo 4. Métodos de arranque

fase de aceleración o durante la fase de desaceleración, pueden ser Bypassados a través de los contactos de Bypass (contactador) durante la operación continua. Las pérdidas en el arrancador suave se pueden reducir gracias a la inferior resistencia que ofrecen los contactos mecánicos de la conmutación.

Hoy en día, en arrancadores suaves, podemos hacer una diferenciación entre dos variantes en la configuración de potencia.

Arrancador suave en dos fases

- Dos fases controladas. **Fig. 4.8**
- Fácil manejo, con tres valores de ajuste (t start, Vstart, t stop)
- Controlado por tiempo, rampa de tensión lineal
- Generalmente con Bypass integrado
- Precio atractivo para alternativa al arranque estrella triangulo
- De motores pequeños a medianos (< 250 kW)
- Programable
- Contactos auxiliares
- Comunicación
- Configuración solo en línea

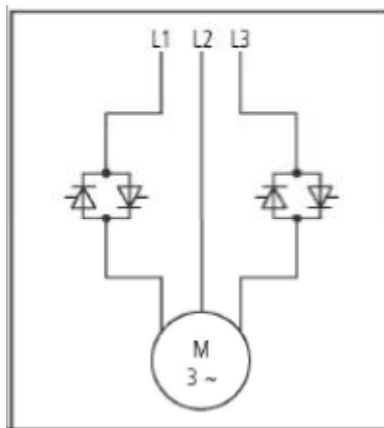


Fig. 4.8 arrancador suave a dos fases

Arrancador suave en tres fases

- Tres fases controladas
- Para tareas exigentes
- Aplicaciones preseleccionadas
- Programable
- Contactos auxiliares
- Circuitos de control y lazo cerrado
- Con limitación de corriente (I^{2t}) y funciones de protección del motor
- Comunicación
- Configuración en línea y en estrella delta interna

El tiempo de aceleración de una unidad con un arrancador suave es el resultado de la configuración de la tensión de arranque (UStart) y el tiempo de rampa (tStart) para el aumento lineal hasta la tensión de completa de red (ULN). La tensión inicial determina el par de arranque del motor. Una alta tensión de inicio y un tiempo de rampa corto corresponde aproximadamente a un arranque directo. En la práctica, el

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

par de arranque necesario (U_{Start}) y el tiempo de rampa (t_{Start}) se configuran de acuerdo a los requisitos del arranque. **Fig. 4.9**

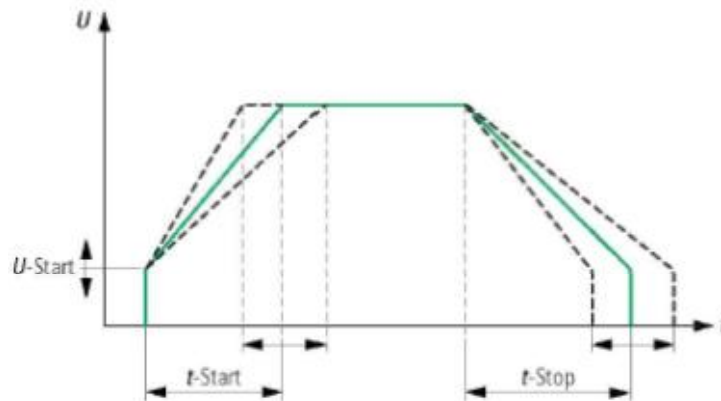


Fig. 4.9 Curva de arranque paro soft starter

El tiempo de rampa ajustado (t_{Start}) no es el tiempo real de aceleración de la unidad. Esto depende de la carga y el par de arranque. El tiempo de rampa sólo controla el cambio en la tensión. En el proceso, la corriente aumenta al máximo y luego cae a la corriente nominal, después conseguimos la velocidad nominal del motor. La corriente máxima entonces se fija para adaptarse a la unidad (motor más carga) y no puede determinarse de antemano. Como resultado, las unidades sometidas a altas cargas en relación con tiempos de rampa largos pueden conducir a una excesiva carga térmica en los tiristores.

Si no podemos superar un determinado nivel de corriente, debemos seleccionar un arrancador suave con limitación de intensidad. Esta variante de arranque está con frecuencia estipulada por las compañías de suministro eléctrico cuando unidades de gran tamaño están conectadas a la red pública (por ejemplo, bombas de elevación, ventiladores para sistemas de ventilación de túneles).

Los arrancadores también permiten controlar el tiempo de reducción de tensión del motor y por lo tanto controlar la rampa de parada de los motores.

El tiempo de parada establecido (t_{Stop}) debe ser más largo dependiendo de la carga o usar una parada sin tiempo "parada libre" de la carga. Los tiristores del arrancador suave también están sujetos a las mismas tensiones térmicas que estuvieron presentes durante el proceso de arranque. Si, por ejemplo, el arrancador está preparado para soportar 10 arranques por hora, estarán permitidos 5 arranques por hora (más 5 paradas por hora). El tiempo de rampa de parada (t_{Stop}) puede seleccionarse independientemente del tiempo de arranque, se requiere con frecuencia en bombas para evitar ondas de presión (golpes de ariete). También se pueden prevenir movimientos espasmódicos que en una parada libre, por ejemplo, pueden provocar un mayor desgaste en correas o cadenas de transmisión y rodamientos.

El diseño del circuito de conmutación y protección (componentes electromecánicos) del circuito principal debe llevarse a cabo en concordancia con la intensidad nominal (I_e) del motor y la categoría de empleo AC-3 (norma IEC 60947-4-1). El diseño del arrancador se lleva a cabo en concordancia con la intensidad nominal (I_e) del motor y la categoría de empleo AC-53a o AC-53b (norma IEC/EN60947-4-2):

- AC-3 = Motores de jaula de ardilla: arranque – paro durante la operación.
- AC-53a = control de motores de jaula de ardilla: funcionamiento continuo con arranques de procesos, maniobras, operaciones
- AC-53b = control de motores de jaula de ardilla: funcionamiento intermitente (funcionamiento intermitente significa que el arrancador se bypassa durante un funcionamiento continuo, por ejemplo, un contactor de bypass).

Capítulo 4. Métodos de arranque

La configuración “en línea” corresponde con la alimentación del motor durante un arranque directo. Sólo conectaremos tres cables al motor en los conectores U1, V1 y W1. Los extremos de los bobinados se configurarán en estrella o en triángulo dependiendo de la tensión nominal del motor. Fig. 4.10

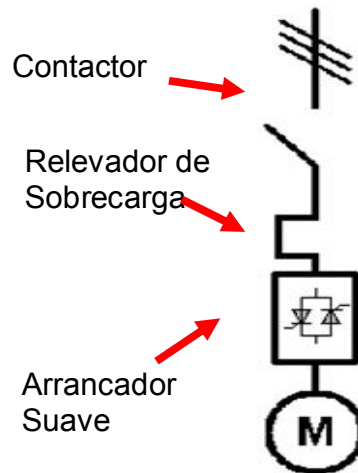


Fig. 4.10 arranque en línea

La configuración “in-delta” sólo es posible con arrancadores suaves con control de las tres fases. Los bobinados del motor están conectados individualmente en serie con los tiristores en triángulo. El diseño del arrancador en esta configuración puede ser de un factor de $1/\sqrt{3}$ ($\sim 0,58 \cdot I_e$) menor que la corriente nominal del motor. Desde un punto de vista económico, esta es una variante de conexión interesante para altas potencias de motor.

Podemos incluir también un relé térmico a la salida del arrancador suave y también se puede reducir con el factor $1/\sqrt{3}$ ($\sim 0,58 \cdot I_e$) inferior a la corriente nominal del motor. Si el relé está instalado en el suministro de red, tendrá que ser evaluado al igual que el contactor o el conmutador usando la corriente asignada de empleo (I_e) del motor. Fig. 4.11

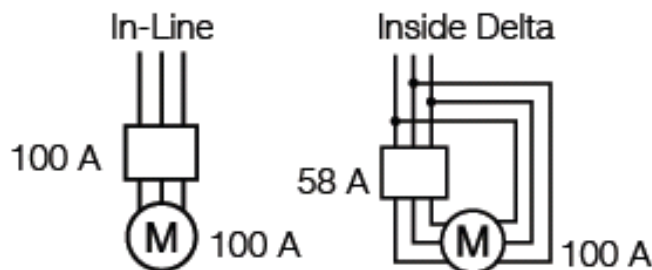


Fig. 4.11 comparativo In-line vs Inside delta.

Para efecto de ejemplo vamos a revisar las características de un arrancador suave PST(B) de la marca ABB el cual tiene las siguientes características

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

- Tensión principal o de alimentación desde 200 a 600 Vca
- Tensión de control 100-250 Vca
- Ajuste de corriente 30% a 115%
- Entradas digitales 4
- Salidas a relevador 3
- Salida analógica 1
- Sonda PTC 1

Opciones avanzadas

- Función límite de corriente (1.5 – 7 Ie)
- Patada de arranque (100% hasta 1.5 seg.)
- Jogo (In 0-1, o por teclado)
- Secuencia de arranque (In 0-1)
- Conexión a By-pass terminales extras
- Sobrecarga integrada cuando se usa By pass
- Horometro integrado
- Contador de No. De arranques
- Programación de fecha y hora
- Graba 20 fallos

Protecciones y fallas

- Protección sobrecarga dual, protección alta corriente
- Protección sobrecarga SCR
- Protección rotor bloqueado
- Protección baja carga
- Protección inversión de fases
- Protección desbalanceo de fases
- Protección PTC
- Falla

Advertencia

- Sobrecarga
- Sobrecarga SCR
- Alta corriente
- Baja corriente

Salida analógica

0...10 v, 0 a 20 mA, 4 a 20 mA, para monitorear I, V, kW, HP, kVAR, temperatura motor PTC, temperatura SCR's, factor de potencia.

Capítulo 4. Métodos de arranque

Arrancador suave PSE ABB. Fig . 4.12

- El arrancador suave PSE es el más compacto del mercado con la función de control de Torque.
- Contiene las funciones de protección más importantes.
- Internamente tiene el relevador electrónico de Protección al motor
- Limitación de Corriente
- Pantalla de Cristal Líquido para ajustes sencillos y realizar monitoreo.
- Ahorro de energía con el contactor de by-pass integrado.
- Ahorro de espacio con diseño compacto.
- Salida analógica para fácil instalación
- Panel externo para montaje en Puerta



Fig. 4.12 Arrancador suave PSE









- Pantalla iluminada. Fig. 4.13
- Terminales señaladas
- Fácil de usar el teclado 4 botones con funciones claras
- Fácil de identificar todos los datos disponibles en el frente
- Iconos para mostrar las funciones, unidades, etc.
- Cuatro posiciones que indican los valores y mensajes
- Posibilidad de bloquear el teclado para evitar que los parámetros sean modificados
- 4 leds de indicación
 - Verde listo
 - Verde arrancado
 - Amarillo protección
 - Rojo falla

Las funciones disponibles (fila superior de izquierda a derecha).







Fig. 4.13 pantalla de cristal

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado solido .

- Ajuste de corriente 
- Rampa de Arranque 
- Rampa de Paro 
- Tensión inicial / final 
- Límite de corriente 
- Control de Torque en inicio 
- Control de Torque en Paro 
- Patada de Arranque 

Las funciones disponibles (fila inferior de izquierda a derecha

- Sobrecarga 
- Baja carga 
- Rotor bloqueado 
- Bus de comunicación 

Información técnica



Limitacion de corriente (Fig. 4.14):

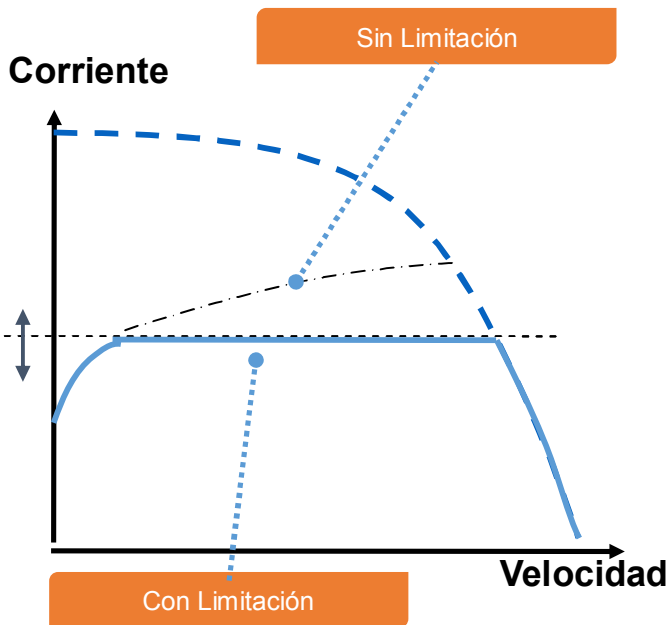


Fig. 4.15 Comparativo con/sin limitación de corriente

- Se utiliza para mantener la corriente de arranque en un nivel máximo preestablecido.
- Especialmente útil para trabajo pesado arranques para ventiladores y bandas transportadoras, donde el tiempo de arranque es demasiado largo.
- Posibilidad de ajustar el nivel (1,5 - 7 X I_e).
- Activa durante el arranque

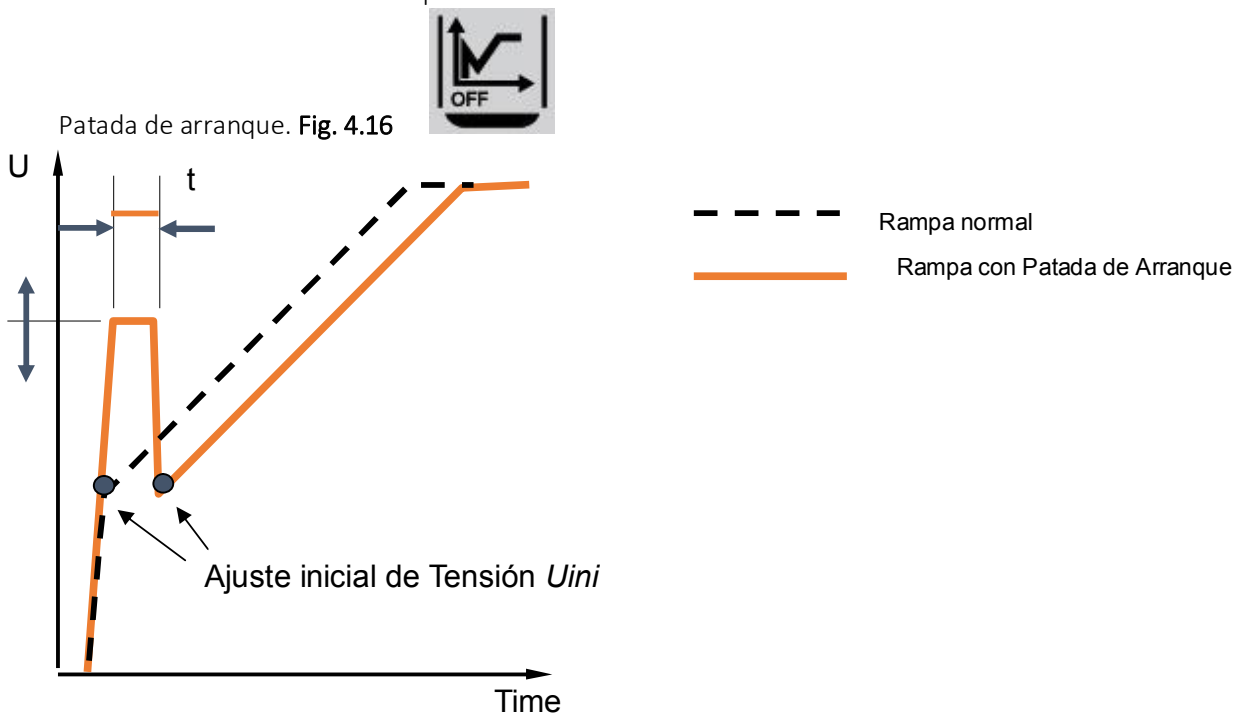


FIG. 4.16 Rampa Kick start o patada de arranque

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado solido .

- Se utiliza para arrancar bombas atascadas o bandas transportadoras con demasiado material.
- Proporciona suficiente Torque durante el arranque, pero que se asegura un arranque suave.
- Posibilidad de ajustar el nivel y la duración (30% - 100%)
 - 30% $U_e \Rightarrow 0,3$ sec
 - 35% $U_e \Rightarrow 0,35$ sec
 - ...
 - 100% $U_e \Rightarrow 1,0$ sec



Relevador electrónico de sobrecarga. Fig. 4.17

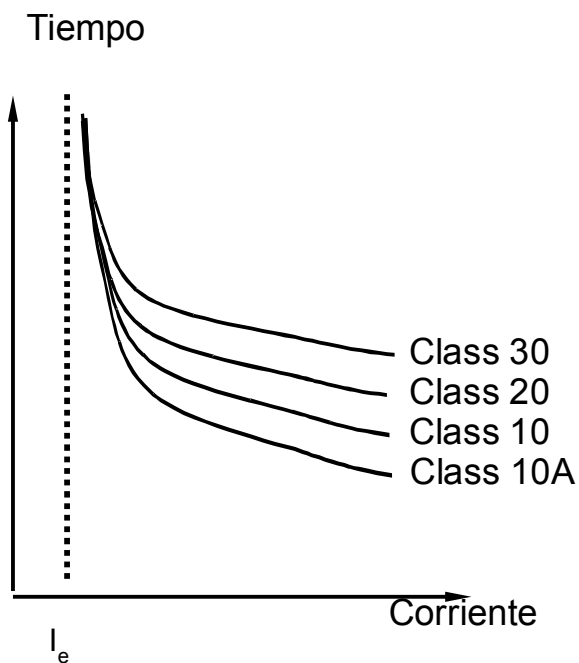


Fig. 4.17 Clases de disparo relevador electrónico

- Se utiliza para proteger el motor contra sobrecalentamiento.
- No hay necesidad de equipo de sobrecarga o electrónica externo.
- 4 clases de arranque
 - 10° arranque ligero
 - 10 arranque normal
 - 20 arranque medio
 - 30 arranque pesado
- Activo en el arranque / paro y funcionamiento continuo.
- Debe enfriarse a 60% antes de rearme.

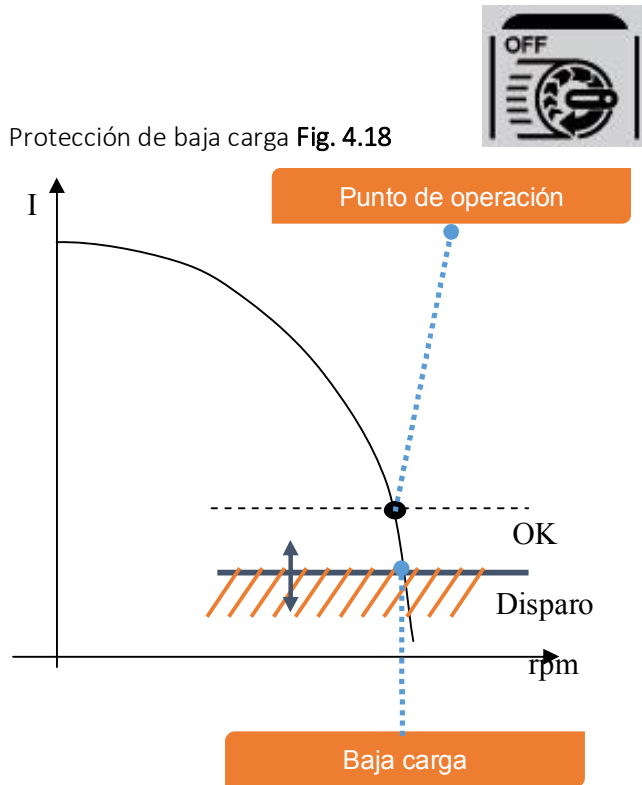


Fig. 4.18 Curva de baja carga

- Se utiliza para detectar cadenas y bandas rotas, funcionamiento en seco de bombas de agua.
- Activa después de llegar a la velocidad nominal.
- Posibilidad de ajuste
 - (0,2 a 1,0 X I_e)
 - Tiempo de retardo 10 segundos

Protección de rotor Bloqueado 

- Se utiliza para detectar, bombas y bandas transportadoras atascadas, etc.
- Activa después de llegar su velocidad nominal.
- Proporciona una protección más rápida que la de SC para corrientes elevadas.
- Posibilidad de ajustar
 - (0,5 a 7,0 X I_e)
 - Tiempo de retardo de 1 segundo.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado solido .

Diagrama de conexión: a diferencia de los arrancadores electromecánicos, el arrancador suave de estado solido tiene un cableado para la parte de potencia y cableado para el control.

Cableado de potencia: de acuerdo al diagrama de conexión (**fig. 4.19**) consta de fusibles ultrarrápidos (protección contra corto circuito), un contactor para des energizar el arrancador suave;

Cableado de control: consta del método de arranque, que puede ser a 2 hilos o un hilo el cual puede ser por medio de una botonera o una salida de un PLC, esto va a depender del proyecto, una fuente de alimentación externa, y cabe la posibilidad de cablear las salidas para señalización.

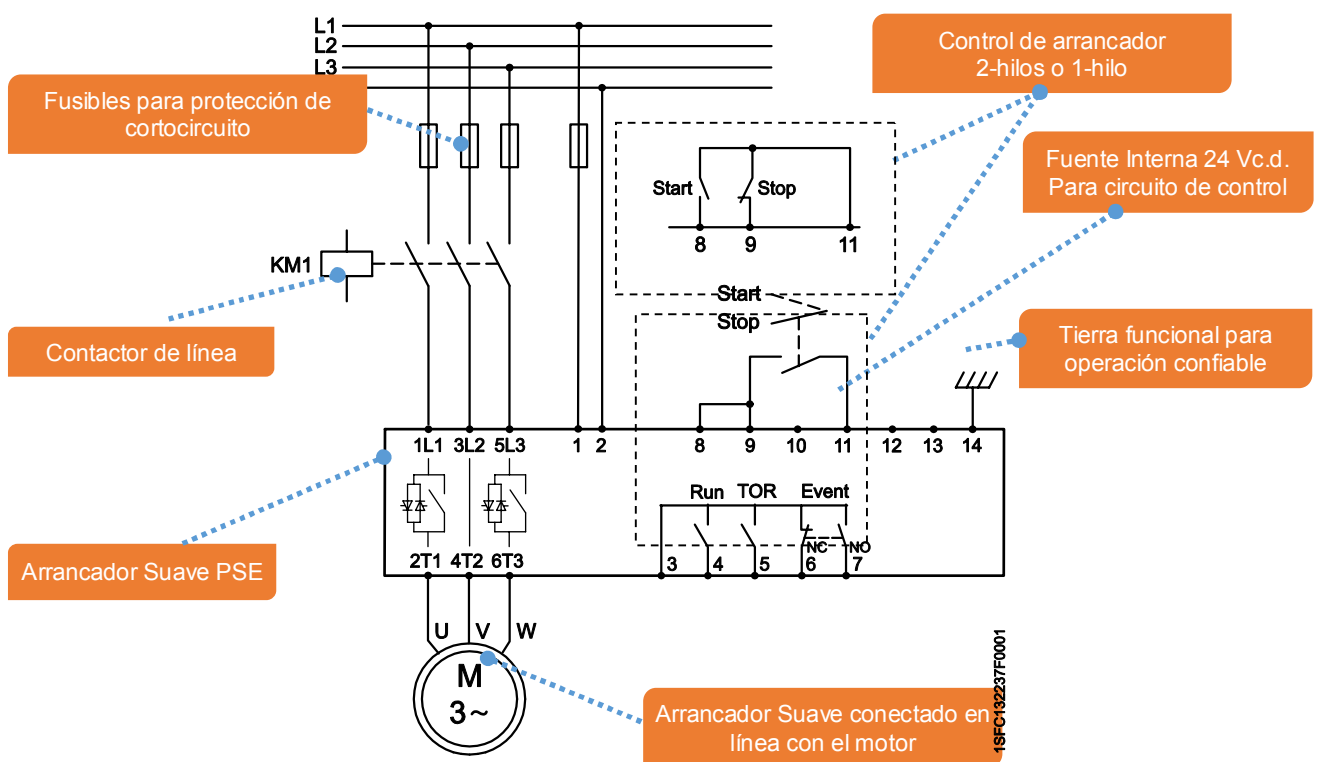


Fig. 4.19 Diagrama de conexión arrancador suave

4.2.2 Variador de Velocidad

Para entender por qué es necesario controlar la velocidad variable, primero es preciso comprender los requisitos de los diferentes procesos. Dichos procesos se pueden dividir en dos grandes categorías: el tratamiento de material y el transporte de material. No obstante, estos dos títulos básicos engloban numerosas subcategorías.

Ambas categorías comparten una característica común: su capacidad de ajustar procesos. El ajuste se consigue gracias a los AVV (accionamientos de velocidad variable). En este capítulo se describen los principales procesos industriales y no industriales que utilizan AVV.

Capítulo 4. Métodos de arranque

Son muchos los procesos industriales, pero en esta lista sólo se mencionan algunos segmentos industriales con procesos que utilizan AVV. El denominador común de estos procesos es que requieren algún tipo de control con AVV.

Por ejemplo, en las aplicaciones de aire acondicionado (parte del HVAC), los requisitos de corriente de aire varían según la humedad y la temperatura de la habitación. No obstante, estos requisitos pueden cumplirse ajustando los ventiladores de alimentación y retorno de aire y, dichos ajustes, se realizan con los AVV.

Los ventiladores también se utilizan en centrales de energía y en la industria química y, en ambos casos, deben ajustarse al proceso principal. En las centrales de energía, el proceso principal varía según la demanda de energía durante las diferentes partes del año, del día o de la semana. Los requerimientos de uso de los AVV también difieren en función del proceso.

En los sistemas de procesamiento, los AVV se utilizan para controlar la potencia mecánica de las distintas máquinas implicadas en el proceso.

Los AVV también pueden controlar el tratamiento del material. Un buen ejemplo de ello es el horno de secado, que siempre debe mantener una temperatura de calor constante. Dicho proceso se regula con los AVV, que controlan la velocidad de los ventiladores de aire caliente.

Forma bien definida

Los aparatos de procesamiento se dividen en dos grupos en función de la forma resultante del material tratado, que puede ser bien definida o indefinida. Los materiales con una forma bien definida, tales como el papel, el metal o la madera, se procesan con máquinas. Un ejemplo de ello son las máquinas para fabricar papel, los laminadores y las líneas de las serrerías.

Forma indefinida

Los materiales con una forma indefinida, como algunos alimentos, plásticos, etc., se procesan con los equipos de planta. Un ejemplo de esta clase de equipo son los agitadores de margarina y diversos tipos de centrífugas y extrusoras.

En la segunda categoría se encuentran las máquinas que transportan el material al emplazamiento correspondiente. Este grupo está formado por máquinas transportadoras, dosificadoras y de cambio de presión. Dichas máquinas se dividen, a su vez, en tres subgrupos diferentes dependiendo de si el material tratado es sólido, líquido o gaseoso.

Los materiales sólidos, como los contenedores de embarque, el metal, la madera, los minerales y, naturalmente, las personas, se transportan con máquinas transportadoras como grúas, cintas transportadoras y ascensores.

Los materiales líquidos, tales como el agua, el aceite o las sustancias químicas líquidas se transportan con bombas.

Los materiales gaseosos, como el aire, se transportan con ventiladores, compresores y fuelles. El aire acondicionado es una aplicación especial de estas máquinas.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

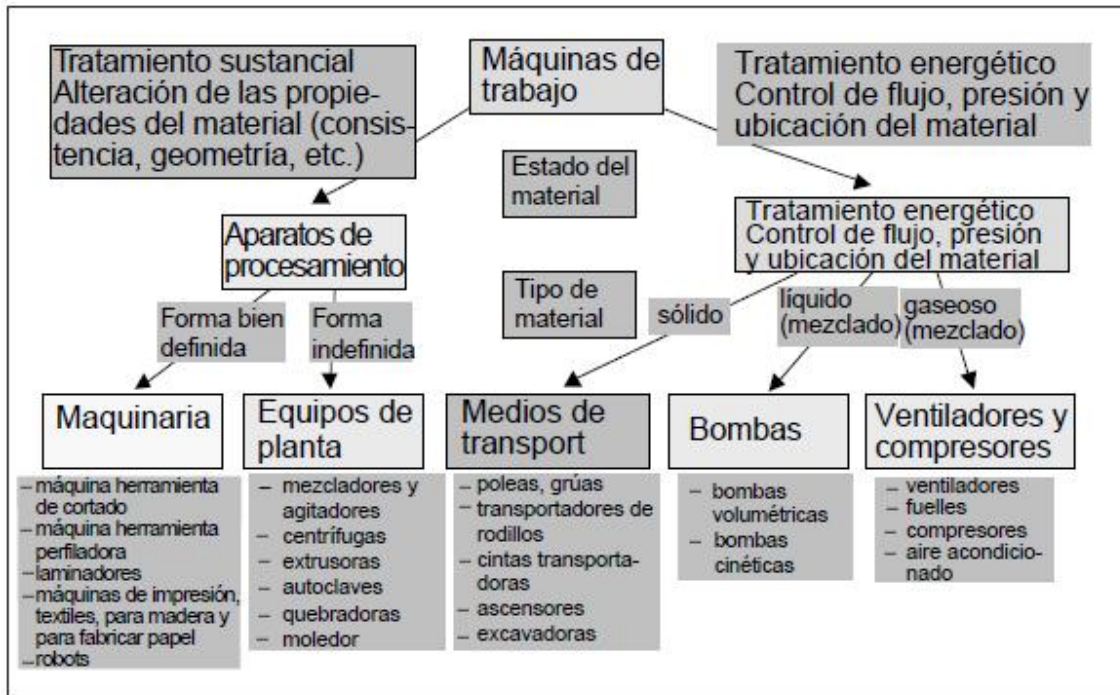


Fig. 4.20 Maquina de trabajo

En la **fig. 4.20** se muestran cinco máquinas diferentes que modelan o transportan distintas clases de material, pero todas pueden utilizarse potencialmente como accionamientos de velocidad variable.

La capacidad del motor de CA de convertir la energía eléctrica en mecánica se basa en la inducción electromagnética. La tensión en el bobinado del estator genera la corriente y el flujo magnético. La dirección de flujo de la corriente del estator puede determinarse con la regla de los tres dedos.

Si se cambia la dirección de la tensión en el bobinado del estator, también puede cambiarse la dirección del flujo. Al variar, en el orden correcto, la dirección de la tensión en el bobinado del motor trifásico, el flujo magnético del motor comienza a girar. En ese instante, el rotor del motor empieza a seguir el flujo con un cierto deslizamiento. Este es el principio básico utilizado para controlar los motores de CA.

El control puede lograrse utilizando un convertidor de frecuencia. Tal y como sugiere su nombre, el convertidor de frecuencia cambia la frecuencia de la corriente y la tensión alterna. Un convertidor de frecuencia se compone de tres partes. El rectificador recibe la corriente trifásica normal de 60Hz y la convierte en corriente continua. La tensión de CC es transmitida al circuito de barras de CC que filtra la tensión pulsante. A continuación, el inversor conecta cada fase del motor a las barras de CC negativas o positivas siguiendo un orden específico

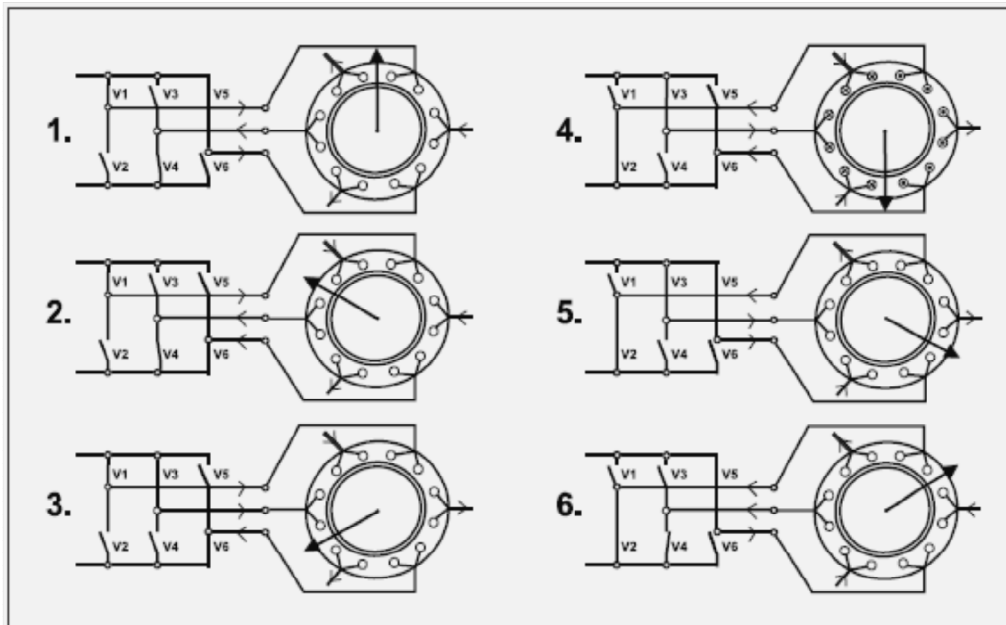


Fig. 4.21 dirección del flujo

Para recibir la dirección de flujo que aparece en la **fig. 4.21**, los conmutadores V1, V4 y V5 deben estar cerrados. Para que el flujo gire en dirección contraria a las agujas del reloj, el conmutador V6 debe estar cerrado, pero el V5 abierto. Si el conmutador V5 no está abierto, el circuito sufrirá un corto circuito. El flujo ha girado 60° en dirección contraria a las agujas del reloj.

En el inversor existen ocho posiciones diferentes de conmutación. En dos de estas posiciones la tensión es equivalente a cero, es decir, todas las fases están conectadas a la misma barra de CC, bien sea negativa o positiva. Por tanto, en las seis posiciones de conmutación restantes, en el bobinado del motor existe una tensión que genera un flujo magnético.

El diagrama muestra las tres posiciones de conmutación y las direcciones de flujo que la tensión del bobinado genera en cada caso. La tensión también genera corriente en el bobinado, la dirección de la cual está marcada con flechas para cada fase.

En la práctica el control no es tan simple como se presenta aquí. El flujo magnético genera unas corrientes en el rotor que complican la situación. Interferencias externas, tales como variaciones de temperatura o de carga, también pueden crear algunas dificultades de control. No obstante, con la tecnología y los conocimientos actuales, es posible tratar esta interferencia de forma eficaz.

Los AVV eléctricos también ofrecen ventajas adicionales, como es el ahorro de energía, dado que el motor no utiliza más energía eléctrica de la necesaria. Asimismo, el control es mejor que con los métodos convencionales, pues los AVV eléctricos permiten aplicar un control progresivo.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado solido .

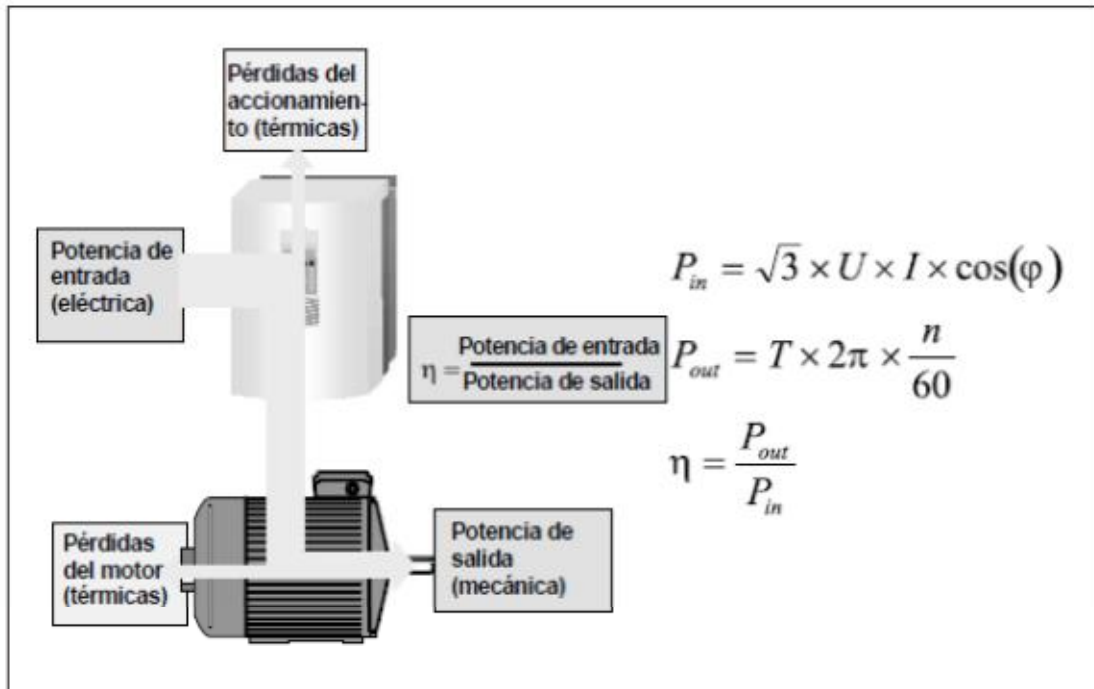


Fig. 4.22 Eficiencia del sistema

La eficacia total del sistema de accionamiento depende de las pérdidas del motor y de su control (fig. 4.22). Tanto las pérdidas del sistema de accionamiento como las del motor son térmicas, y por tanto aparecen en forma de calor. La potencia de entrada del sistema de accionamiento es eléctrica, mientras que la de salida es mecánica. Por esa razón, para calcular el coeficiente de eficacia (η) es necesario poseer conocimientos de ingeniería eléctrica y mecánica.

La conmutación eléctrica con transistores es muy eficaz, así que la eficacia del convertidor de frecuencia es muy elevada, del 0,97 al 0,99. La eficacia del motor se halla normalmente entre el 0,82 y el 0,97, dependiendo del tamaño del motor y de la velocidad nominal. Por tanto, puede afirmarse que la eficacia total del sistema de accionamiento es siempre superior al 0,8 si está controlado por un convertidor de frecuencia.

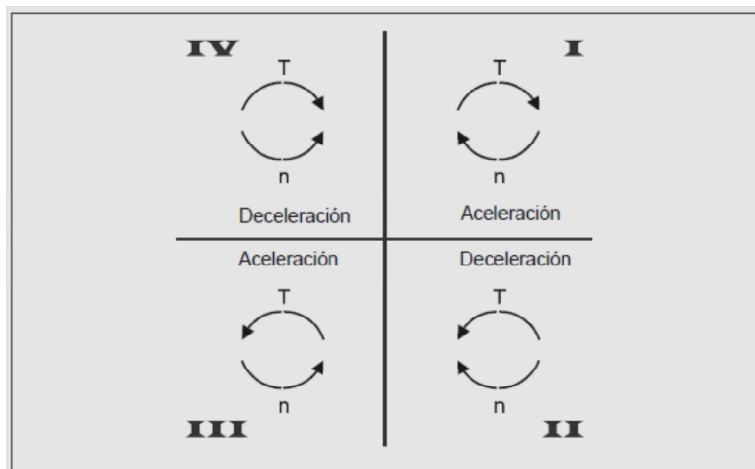


Fig. 4.23 Accionamiento de cuatro cuadrantes.

Capítulo 4. Métodos de arranque

En algunos casos, se requiere una rotación inversa del motor y, además, también pueden variar los requisitos de dirección del par. La combinación de estos factores forma el denominado “accionamiento de cuatro cuadrantes”. El nombre deriva de los cuatro cuadrantes diferentes (I al IV) que se muestran en la **fig. 4.23**.

Cuadrante I: En el primer cuadrante el motor gira en la dirección de las agujas del reloj. Dado que el par sigue la misma dirección que la velocidad, el accionamiento se acelera.

Cuadrante II: En el segundo cuadrante el motor sigue girando en la dirección de las agujas del reloj, pero el par está en la dirección opuesta, así que el accionamiento se desacelera.

Cuadrantes III y IV: En el tercer y cuarto cuadrante, el motor gira en dirección contraria a las agujas del reloj y el motor vuelve a acelerarse o desacelerarse dependiendo de la dirección del par.

Con un convertidor de frecuencia, los cambios en la dirección del par pueden aplicarse independientemente de la dirección de giro. Para producir un accionamiento de cuatro cuadrantes eficaz, es necesario algún tipo de dispositivo de frenado. Esta clase de control del par es especialmente necesario para las aplicaciones de grúa, donde la dirección de rotación puede cambiar mientras que la del par permanece igual.

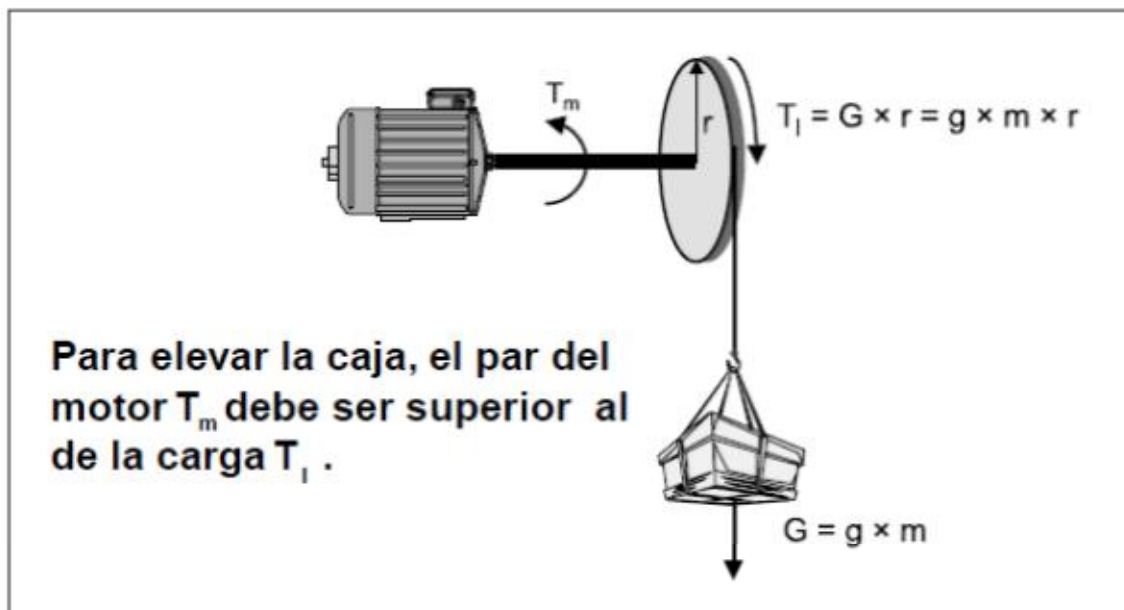


Fig. 4.24 Par del motor.

Retomando las definiciones que al inicio se dieron el motor debe producir el par requerido para superar el par de carga. El par de carga se compone de la fricción, de la inercia de las partes en movimiento y de la propia carga, que depende de la aplicación. En el ejemplo de la **fig. 4.24**, para elevar la caja, el par del motor debe ser superior al de la carga, que depende de la masa de la caja.

Los factores de carga varían según la aplicación. Por ejemplo, en una trituradora, el par de carga no sólo depende de la fricción y de la inercia, sino también de la dureza del material a quebrar.

En el caso de los ventiladores y los fuelles, un cambio en la presión de aire puede, entre otros factores, afectar al par de carga.

En la mayoría de procesos existe como mínimo una variable.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado solido .

Esta variable requiere un ajuste del proceso (fig. 4.25). Por tanto, los procesos y volúmenes de material variables requieren algún tipo de control.

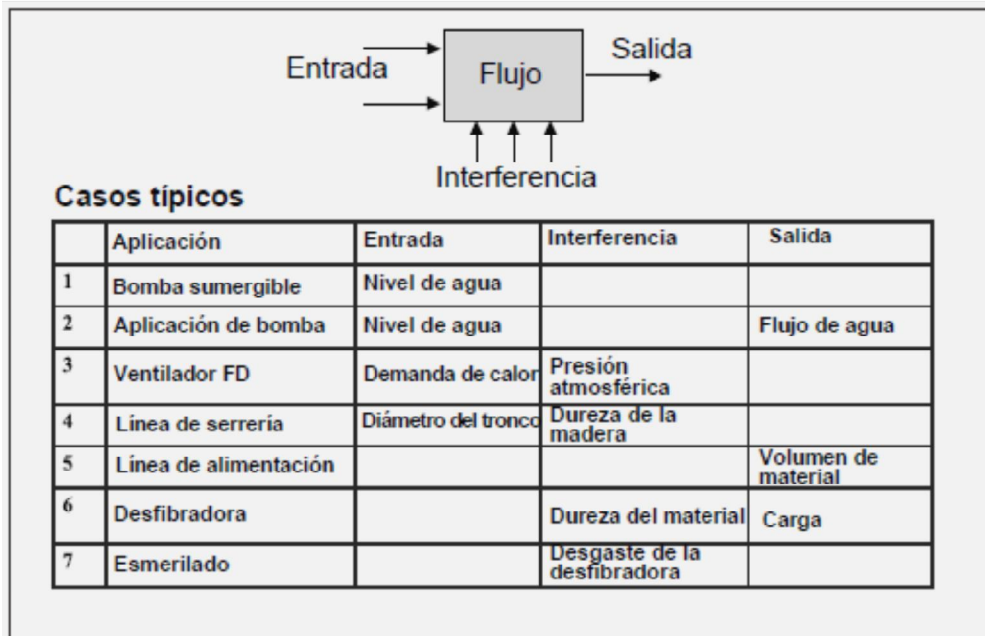


Fig. 4.25 Ajuste del proceso.

En un proceso pueden existir numerosos parámetros distintos, pero los más comunes son la entrada, la salida y la interferencia. Es posible que estos parámetros deban ser constantes o que varíen en función de un patrón predeterminado. Tal como y se ha comentado, en los procesos siempre hay entradas y salidas y, casi siempre, interferencias.

En algunos procesos no existe interferencia alguna y la entrada es constante. Este tipo de procesos funcionan sin ningún control de velocidad variable. No obstante, si es necesario cambiar los parámetros de salida, la entrada es variable, o existen interferencias, un control de la velocidad variable puede ser la solución para cumplir con los requisitos del proceso.

En la tabla inferior se muestra una lista de algunos procesos que exigen un control de velocidad variable así como las razones que determinan dicho control: la entrada, la interferencia o la salida.

Existen muchos métodos de control más sencillos, tales como el regulador por estrangulación o el control de derivación. El diseño de esta clase de equipos suele ser bastante sencilla y, en un principio, la inversión puede parecer rentable.

Sin embargo, estos equipos presentan muchos inconvenientes.

Por ejemplo (fig. 4.26), con un control sencillo, es muy difícil obtener una capacidad óptima del proceso y ofrecer la mejor calidad posible. Asimismo, un aumento en la capacidad de producción suele implicar una reconstrucción del proceso y, con cada arranque directo en línea, existe el riesgo de producir una avería eléctrica y/o mecánica. Los métodos de control más sencillos también consumen más energía por lo que, además de representar un coste operativo superior al de los AVV, el impacto sobre el medio ambiente también es mayor. Las centrales de energía, por ejemplo, emiten una mayor cantidad de CO2 a la atmósfera. En consecuencia, el coste del ciclo de vida total de los métodos de control más sencillos es muy superior al de los AVV.

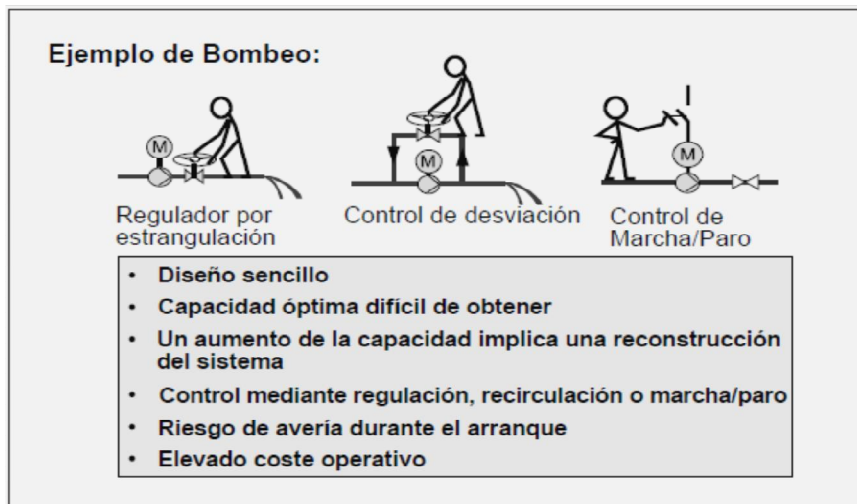


Fig. 4.26 Ejemplo de bombeo sencillo.

En la mayoría de sistemas el mejor método de control es el AVV. Imagine, por ejemplo, que está conduciendo un coche por la autopista y que entra en una población. Para no arriesgar su vida ni la de otras personas, debe reducir la velocidad (**fig. 4.27**)

La mejor manera sería reducir la velocidad de rotación del motor levantando el pie del acelerador y, en caso necesario, reduciendo de marcha. Otra posibilidad consistiría en emplear la misma marcha, mantener el pie sobre el acelerador y simplemente frenar para reducir la velocidad. En este último caso no sólo produciría un desgaste del motor y los frenos, sino que además consumiría una gran cantidad de combustible y mermaría su control del vehículo. Además, de este modo tampoco cumpliría con el objetivo principal de no arriesgar su vida ni la de otras personas.

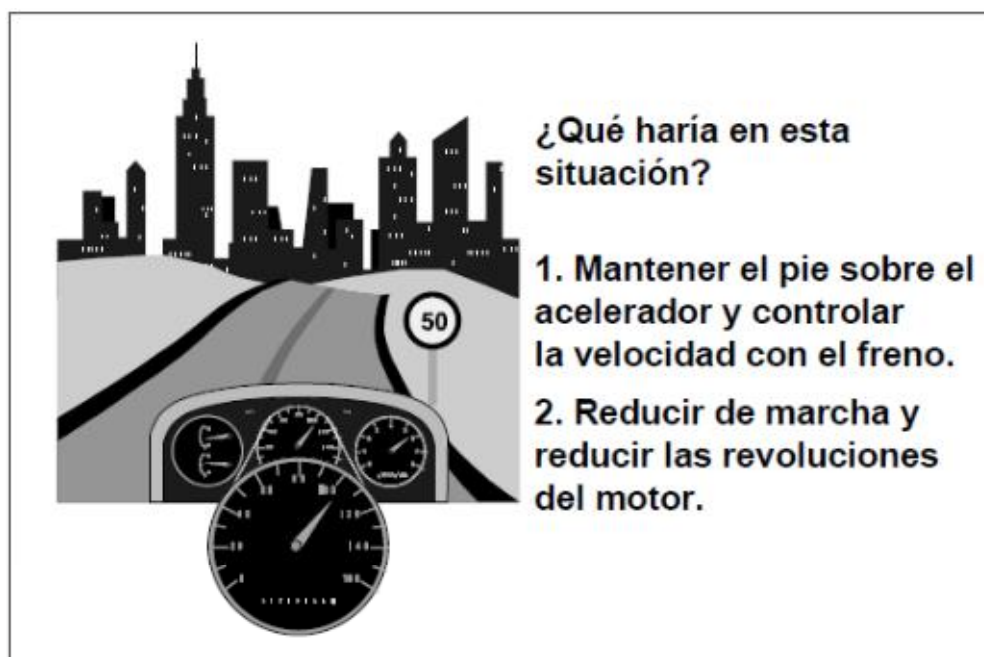


Fig. 4.27 Ejemplo automovil.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

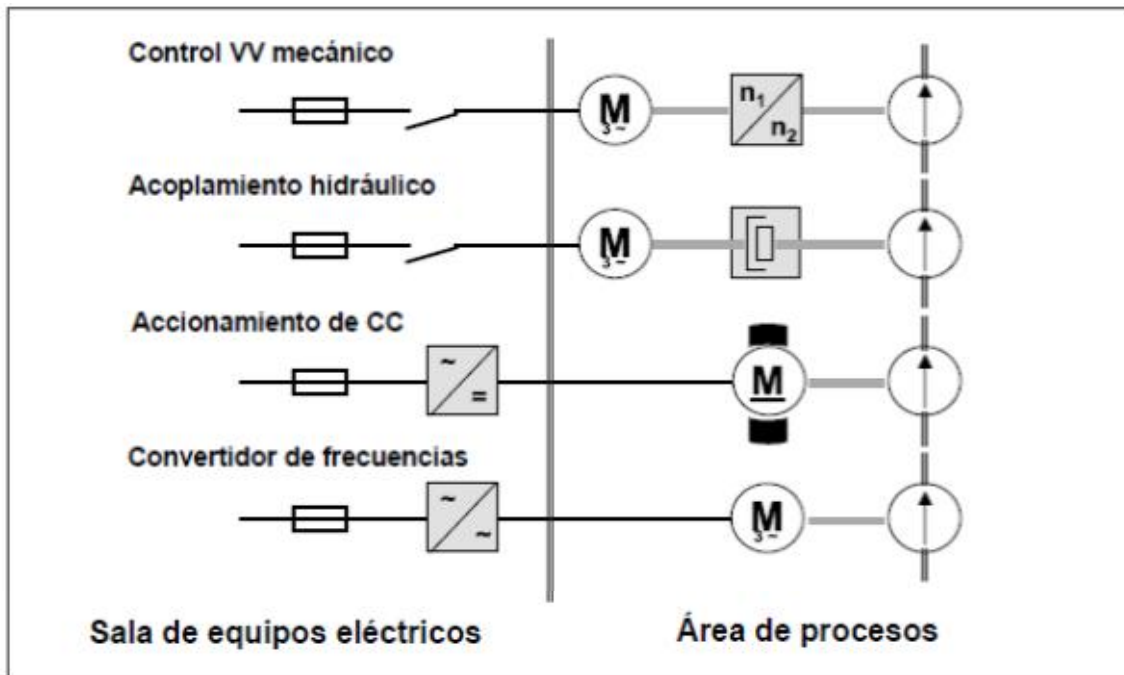


Fig. 4.28 Metodos de accionamiento de velocidad variable AVV.

En la **fig. 4.28** se muestran los cuatro AVV más habituales en el sector industrial. Los controles mecánicos de velocidad variable suelen utilizar un accionamiento por correa y se controlan moviendo de forma manual las poleas cónicas o bien utilizando motores de posicionamiento.

En el acoplamiento hidráulico se aplica el principio de la turbina.

Al cambiar el volumen de aceite en el acoplamiento, varía la diferencia de velocidad entre los ejes de accionamiento y los accionados. La cantidad de aceite se controla mediante bombas y válvulas.

En el accionamiento de CC, un convertidor de CC cambia la tensión de alimentación suministrada al motor de CC. En el motor, un inversor mecánico -un conmutador- transforma la corriente continua en alterna.

En el convertidor de frecuencia o en el accionamiento de CA, se utiliza un motor de jaula de ardilla estándar y, por tanto, no se requieren inversores mecánicos. Tal y como se ha comentado al principio de esta guía, la velocidad del motor se regula con un convertidor de frecuencia que cambia la frecuencia de tensión del motor. El convertidor de frecuencias es controlado por señales eléctricas.

El diagrama muestra el emplazamiento del equipo de control para cada tipo de AVV. En el caso de los AVV mecánicos o hidráulicos, el equipo de control se encuentra entre el motor y la máquina de trabajo, lo cual significa que el mantenimiento es muy dificultoso.

En los AVV eléctricos, los sistemas de control se hallan en una sala de equipo eléctrico y sólo el motor de accionamiento se encuentra en el área de procesos, pero ésta es tan sólo una de las ventajas de los AVV eléctricos. En la página siguiente se presentan el resto de ventajas de este tipo de accionamiento.

Capítulo 4. Métodos de arranque

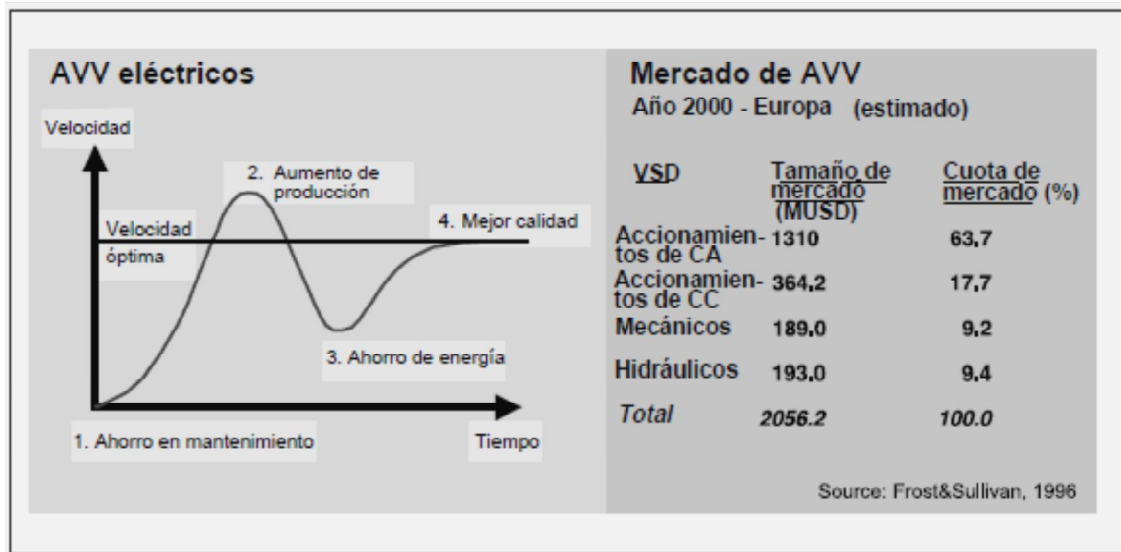


Fig. 4.29 Argumentos AVV

Aquí se presentan los cuatro argumentos más importantes para utilizar AVV eléctricos así como la cuota de mercado de los AVV prevista en Europa para el año 2000. Las cuatro ventajas principales de los AVV eléctricos se resaltan en los puntos de inflexión de la curva de velocidad (fig. 4.29).

El arranque directo en línea somete al motor y al equipo eléctrico a una serie de esfuerzos. Con los AVV eléctricos, se obtiene un arranque suave, que tiene una influencia directa sobre los costes de mantenimiento.

Los equipos de procesos suelen estar diseñados de modo que puedan adaptarse a futuros aumentos de productividad.

Reemplazar el equipo de velocidad constante para alcanzar volúmenes de producción más elevados implica un consumo de tiempo y dinero. Con los accionamientos de CA, un aumento del 5 al 20 por ciento de la velocidad no representa problema alguno ni requiere una inversión adicional.

En muchos procesos varían los volúmenes de producción, y cambiarlos de forma manual suele resultar muy ineficaz. Con los AVV eléctricos, es posible cambiar el volumen de producción simplemente cambiando la velocidad del motor.

De este modo se ahorra una gran cantidad de energía, sobre todo en las aplicaciones de bombas y ventiladores, ya que la potencia del eje es proporcional a la velocidad de flujo elevada al cubo.

El control preciso de la velocidad que ofrecen los AVV eléctricos tiene como resultado una optimización de los procesos. Un control óptimo de los procesos permite obtener un producto de la mejor calidad y, por tanto, el mejor beneficio para el cliente.

Debido a estas ventajas y, tal como se refleja en la tabla superior, los AVV eléctricos dominan el mercado. Los accionamientos de CA y de CC representan, conjuntamente, más del 75% del mercado de AVV en Europa para el año 2000 y, los accionamientos de CA, más del 50%.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

El mercado de los accionamientos de CA está creciendo a un ritmo aproximado del 10% anual, lo cual justifica el crecimiento global del mercado eléctrico y de los AVV. La cuota de mercado de los accionamientos de CC está disminuyendo, mientras que el mercado total de CC permanece aproximadamente constante. Este progreso se debe al desarrollo de la tecnología de los accionamientos de CA.

Tal como se ha mencionado, el accionamiento de CA ofrece muchas ventajas en comparación al resto de métodos de control de procesos. La diferencia entre el motor de CA y el de CC es que este último dispone de un conmutador mecánico con escobillas de carbón que requieren un mantenimiento regular. Además, el conmutador complica la estructura del motor y consume energía. Estas son las principales razones por las cuales la cuota de mercado de los accionamientos de CA está creciendo en comparación a la de los accionamientos de CC.

Si se tiene en cuenta toda la información presentada hasta el momento, puede afirmarse que el accionamiento de CA es el líder en métodos de control.

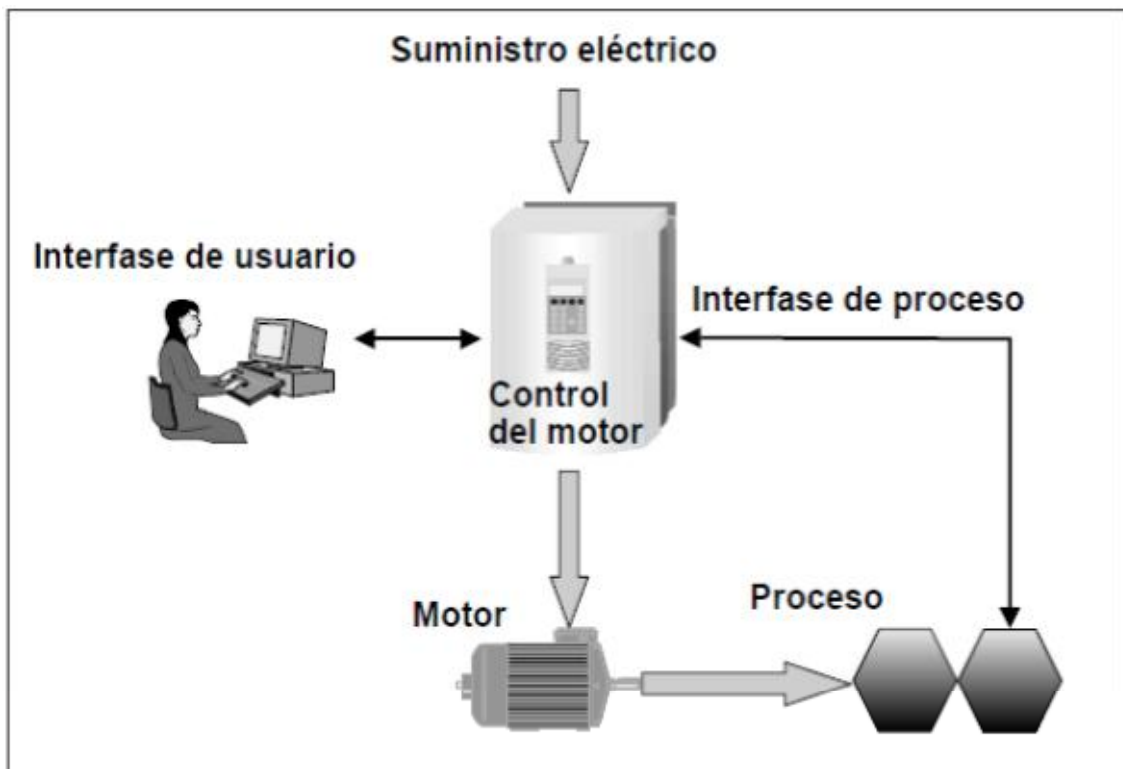


Fig. 4.30 Funciones básicas

En la fig. 4.30 se presentan las funciones básicas de un accionamiento de CA. El control del motor de accionamiento de CA está formado por cuatro componentes distintos: la interface de usuario, el motor, el suministro eléctrico y la interface de proceso.

Capítulo 4. Métodos de arranque

El suministro eléctrico ofrece al accionamiento la electricidad requerida; un criterio de selección para el accionamiento sería la tensión de suministro y la frecuencia. El accionamiento de CA convierte la frecuencia y la tensión, y alimenta al motor. El proceso de conversión se controla mediante señales del proceso o del usuario procedentes de las interfaces de proceso y usuario.

La interface de usuario permite controlar el accionamiento de CA y obtener información sobre el proceso a través del accionamiento. De este modo, es fácil integrar el accionamiento con otros equipos de control de procesos y otros sistemas de sobre control.

Si el motor se acciona sin un convertidor de frecuencia, no pueden modificarse las curvas de capacidad de carga; el motor producirá un par específico a una velocidad determinada y no podrá excederse el par máximo.

Con un accionamiento de convertidor de frecuencia, existen diferentes opciones de carga (**fig. 4.31**). La curva estándar, la Curva 1 del diagrama, puede utilizarse de forma continua, mientras que las otras curvas sólo pueden utilizarse durante ciertos períodos de tiempo, ya que el sistema de enfriamiento del motor no está diseñado para este uso tan pesado.

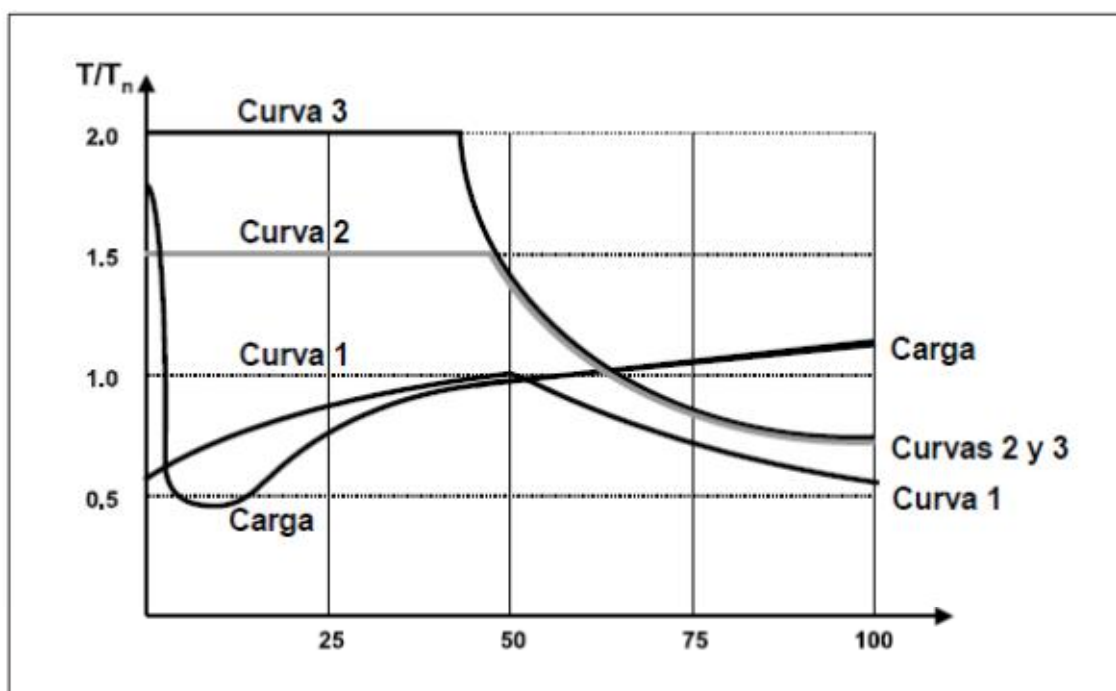


Fig. 4.31 Curvas de carga.

Los niveles de capacidad más elevados pueden ser necesarios, por ejemplo, durante el arranque. En ciertas aplicaciones, para el arranque se requiere hasta el doble del par normal. Ello es posible con un convertidor de frecuencia porque el motor se dimensiona en función de su uso normal y, de este modo, se logra reducir el coste de la inversión.

Para poder utilizar estas funciones, es muy importante que la carga, el accionamiento de CA y el motor sean compatibles.

En caso contrario, el motor o el convertidor pueden sobrecalentarse y averiarse

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

Características importantes

- Entradas y salidas
- Función de inversión
- Aceleración/desaceleración de tiempos de rampa
- Valores V/Hz del par variable
- Refuerzo de par
- Eliminación de vibración mecánica
- Límites de carga para evitar fallos de interferencia
- Funcionamiento con cortes de red
- Función de bloqueo
- Compensación de deslizamiento
- Arranque en giro

El accionamiento de CA dispone de otras características y funciones internas a veces requeridas para controlar mejor los procesos. En la tabla se muestran algunos ejemplos de estas características. Por ejemplo, las entradas y salidas suministran información al accionamiento sobre los tipos de procesos y, de este modo, el accionamiento controla el motor en función de la información recibida. Asimismo, con el accionamiento de CA es posible limitar la carga para evitar fallos de interferencia y para proteger la máquina de trabajo y el sistema de accionamiento.

Con los accionamientos de CA invertir la rotación del motor resulta fácil y, con los convertidores de frecuencia de ABB, ello se consigue simplemente pulsando un botón. Asimismo, es posible establecer diferentes tiempos de aceleración y deceleración de rampa y modificar la forma de la rampa según los deseos del usuario. En la **fig. 4.32** se muestra una rampa en S, mientras que otra posibilidad sería una rampa lineal (**fig. 4.33**).

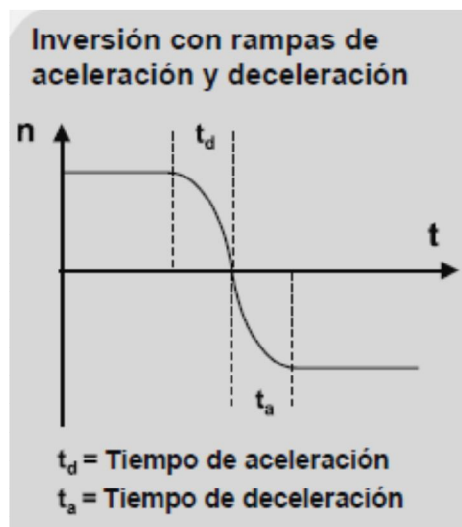


Fig. 4.32 Rampa en S

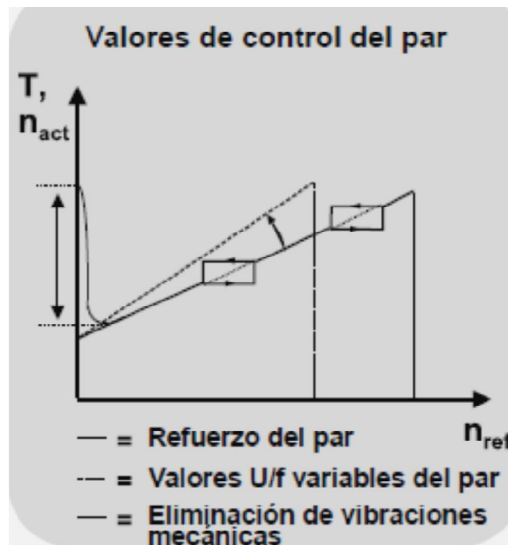


Fig. 4.33 Rampa lineal.

El control del par es relativamente fácil con los accionamientos de CA. El refuerzo del par, comentado anteriormente, es necesario si se requiere un par de arranque muy elevado. Los valores U/f variables del par permiten obtener un par máximo con una velocidad de rotación inferior a la normal.

Es posible eliminar las vibraciones mecánicas si se evitan ciertas velocidades críticas. Es decir, si un motor se acelera cerca de su velocidad crítica, el accionamiento no permitirá que la velocidad real del motor siga la velocidad de referencia.

Una vez superado el punto crítico, el motor regresará rápidamente a su curva regular y pasará la velocidad crítica.

El funcionamiento con cortes de la red es una función que se utiliza cuando hay cortes en la tensión de alimentación de entrada. En estos casos, el accionamiento de CA continúa funcionando con la energía cinética del motor en rotación. El accionamiento estará totalmente operativo siempre y cuando gire el motor y genere energía para el accionamiento.

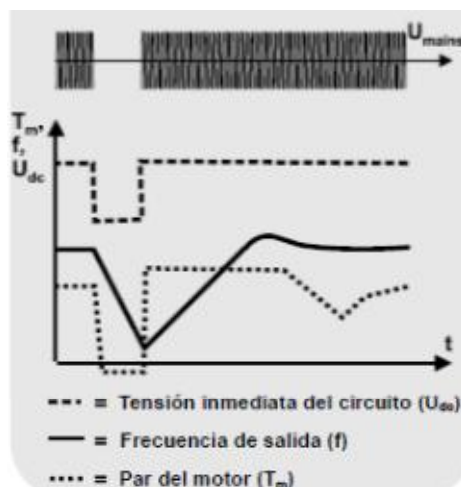


Fig. 4.34 Funcionamiento con cortes de red.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

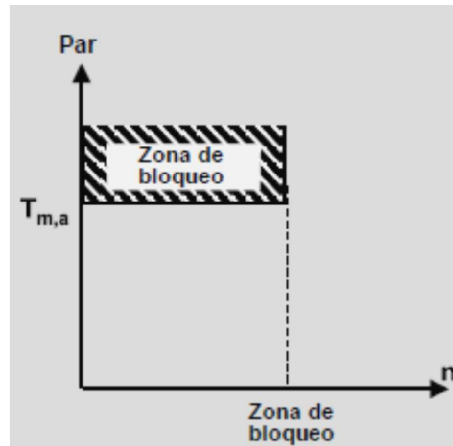


Fig. 4.35 Función de bloqueo.

En caso de bloqueo (fig. 4.35), puede protegerse el motor con la función de bloqueo del accionamiento de CA. También es posible ajustar los límites de supervisión y seleccionar el modo de reacción del accionamiento en una situación de bloqueo. La protección se activa si se cumplen tres condiciones simultáneamente:

1. La frecuencia de accionamiento debe estar fijada por debajo de la frecuencia de bloqueo.
2. El par del motor debe superar el valor máximo permitido calculado por el software del accionamiento. Este valor varía de forma continua en función de diferentes factores como, por ejemplo, la temperatura del motor. Si se cumplen las condiciones 1 y 2, el motor se encontrará en la zona de bloqueo marcada en el diagrama.
3. La última condición es que el motor no haya permanecido en la zona de bloqueo más tiempo del establecido por el usuario.

Si aumenta el par de carga del motor, la velocidad del motor disminuirá tal y como se muestra la **fig. 4.36**. Para compensar este deslizamiento, puede modificarse la curva del par/de la velocidad con el convertidor de frecuencia a fin de aumentar el par con la velocidad anterior.

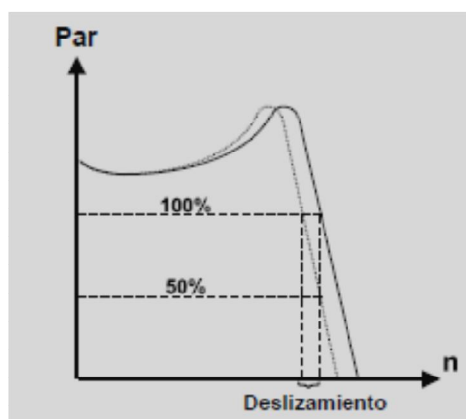


Fig. 4.36 Compensación de deslizamiento.

Capítulo 4. Métodos de arranque .

La función de arranque con giro se utiliza si el motor está conectado a un volante o a una carga de alta inercia. Si el motor y el volante están girando y la potencia está conectada al motor, el convertidor de frecuencia lo alimentará con la tensión y la frecuencia exactas. Con la función de arranque con girando en esta situación, conectar la potencia a un motor sin accionamiento de CA originaría ciertos problemas (**fig. 4.37**).

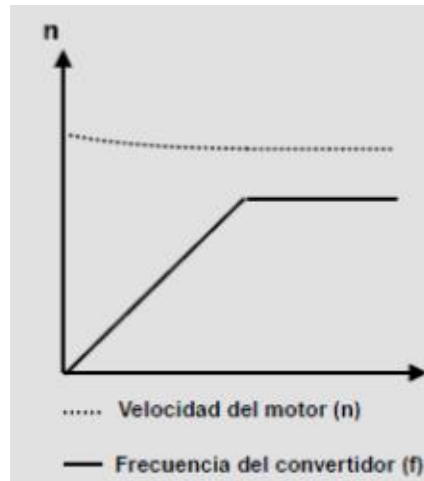


Fig. 4.37 Arranque con giro.

Todos los sistemas de accionamiento deben enfrentarse a diferentes presiones medioambientales, tales como la humedad o las perturbaciones eléctricas. El motor de jaula de ardilla es muy compacto y puede utilizarse en condiciones muy hostiles.

El grado de protección IP 54 garantiza su funcionamiento en un entorno con polvo y bajo agua de aspersion procedente de cualquier dirección (**fig. 4.38**).

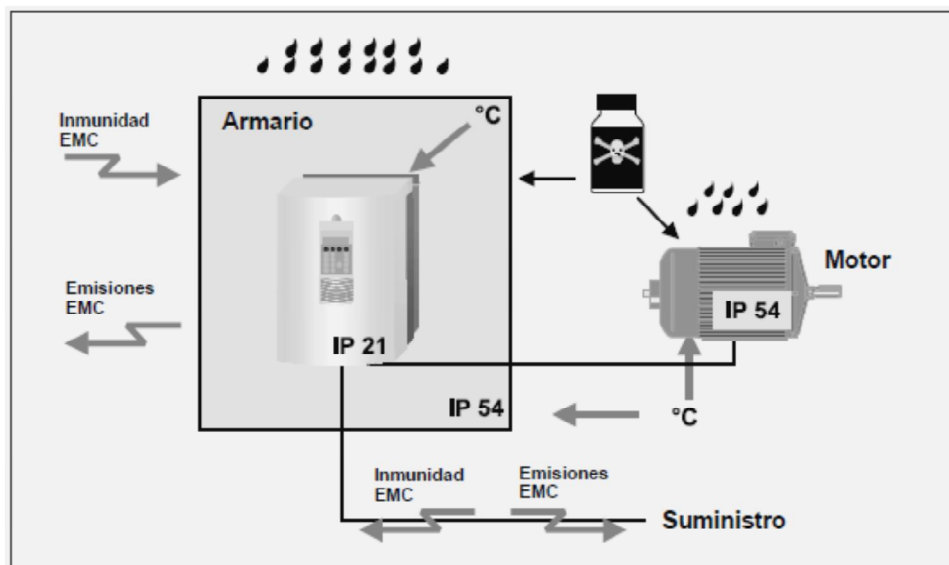


Fig. 4.38 Grado de protección.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

El convertidor de frecuencia suele disponer de un grado de protección IP 21, lo cual significa que no se debe entrar en contacto con las partes bajo tensión y que el goteo de agua vertical no resulta perjudicial. Si se requiere un nivel de protección superior, puede instalarse, por ejemplo, un accionamiento en el interior de un armario que disponga del grado de protección requerido. En tal caso, es esencial garantizar que la temperatura interior del armario no exceda los límites permitidos.

Otra característica medioambiental importante es la compatibilidad electromagnética (EMC). Es muy importante que un sistema de accionamiento cumpla con las directivas EMC de la Unión Europea. Es decir, el sistema de accionamiento debe soportar perturbaciones conductivas y radiantes y, además, no debe emitir perturbaciones conductivas ni radiantes al suministro eléctrico ni al medio ambiente.

En la actualidad siguen vendiéndose muchos motores sin accionamientos de CA de velocidad variable. En este gráfico sectorial se muestra cuántos motores con una potencia inferior a los 2,2 kW se venden con convertidores de frecuencia y cuántos sin. Anualmente, sólo un 3% de los motores de esta gama de potencia se venden con convertidor de frecuencia, mientras que el 97% se venden sin accionamiento de CA (**fig. 4.39**).

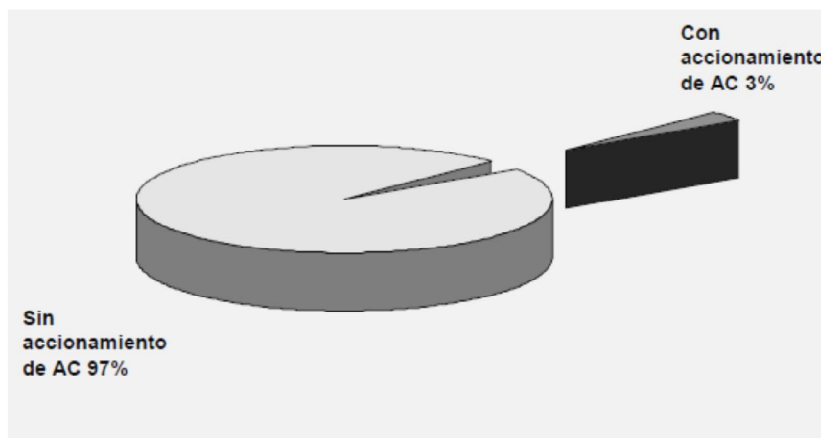


Fig. 4.39 Motores de AC y sin accionamientos de AC.

La tecnología del accionamiento de CA difiere completamente de la tecnología de otros métodos de control más sencillos.

La diferencia es comparable a la existente entre un zepelín y un avión moderno.

También podría compararse la tecnología del accionamiento de CA con el desarrollo del disquete al CD-ROM. Aunque el disquete es un método de almacenamiento de información sencillo, sólo puede manejar una pequeña fracción de la información que puede tratar una USB (**fig. 4.40**).

Capítulo 4. Métodos de arranque

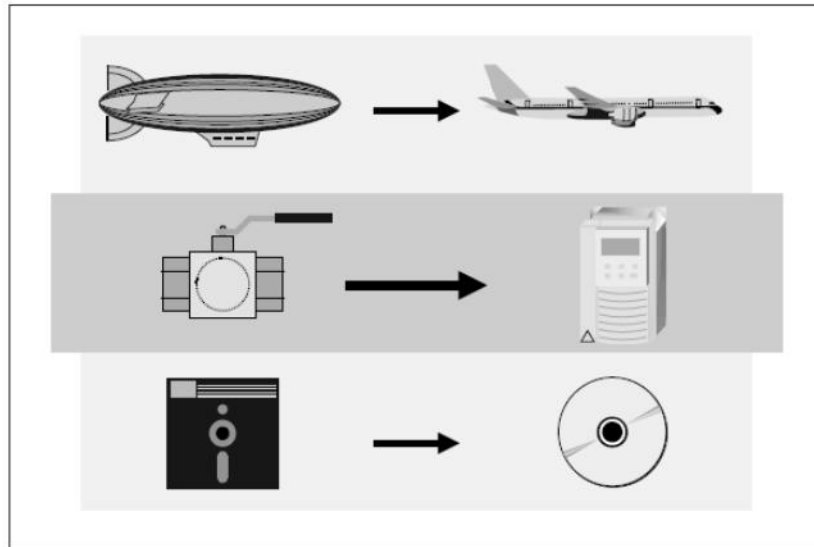


Fig. 4.40 Comparativo

Las ventajas de esta innovación son ampliamente conocidas.

Del mismo modo, la tecnología del accionamiento de CA se basa en una tecnología totalmente diferente a la de los primeros métodos de control. En esta guía se presentan las ventajas del accionamiento de CA en comparación con otros métodos de control más sencillos (fig. 4.41).

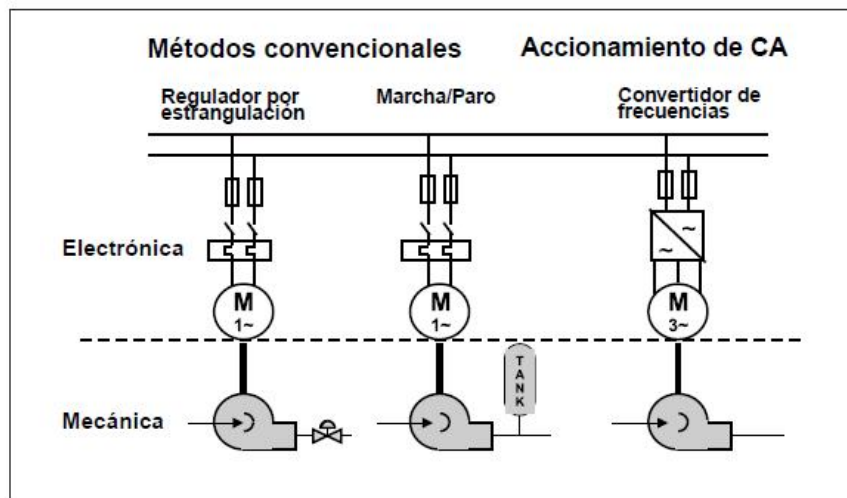


Fig. 4.40 Métodos de control.

A fin de realizar una comparación adecuada de los costes, es necesario analizar las configuraciones de los diferentes métodos de control. Hemos tomado como ejemplo el proceso de bombeo. En los métodos tradicionales, siempre existe una pieza mecánica y otra eléctrica.

En el caso de la regulación, se necesitan fusibles, contactores y reactores para el sistema eléctrico y válvulas para el mecánico. En un control Marcha/Paro, se precisan los mismos componentes eléctricos además de un depósito con fluido motor para el sistema mecánico. El accionamiento de CA ofrece una

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado solido .

nueva solución para la que no se requiere un sistema mecánico porque todo el dispositivo de control se halla en el sistema eléctrico.

Otra ventaja en cuanto al coste es el hecho de que, con un accionamiento de CA, puede utilizarse un motor trifásico estándar, que resulta más económico que el motor monofásico utilizado en el resto de métodos de control. Asimismo, puede seguir utilizándose la corriente monofásica de 220V para potencias inferiores a los 2,2kW.

En la **fig. 4.41** se comparan las características de los métodos de control tradicionales con las del accionamiento de CA junto con su impacto sobre el coste. En los métodos convencionales existen componentes mecánicos y eléctricos que, por regla general, deben adquirirse de forma independiente. El coste, por tanto, es superior al que representaría si los componentes se compraran de forma conjunta.

| Métodos convencionales: | Accionamiento de CA: |
|---|--------------------------------------|
| - piezas eléctricas y mecánicas | - todo en uno |
| - muchas piezas eléctric. | - sólo un componente eléctrico |
| - las piezas eléctricas requieren manten. regular | - sin piezas mecánicas, sin desgaste |
| - el control mecánico consume energía | - ahorra energía |

Fig. 4.41 comparación métodos de control.

Asimismo, las piezas mecánicas sufren un desgaste rápido que afecta directamente al costo de mantenimiento y, a largo plazo, el mantenimiento representa un coste muy importante.

Los métodos tradicionales también disponen de componentes eléctricos y, si existen diferentes clases de componentes en lugar de un solo tipo, los costes de instalación se multiplican, como mínimo, por dos.

Por último, pero no por ello menos importante, los controles mecánicos consumen una gran cantidad de energía, mientras que los accionamientos de CA prácticamente ahorran energía.

Con ello no sólo se reducen los costes, sino que se minimiza el impacto sobre el medio ambiente reduciendo las emisiones de las centrales de energía.

Capítulo 4. Métodos de arranque .

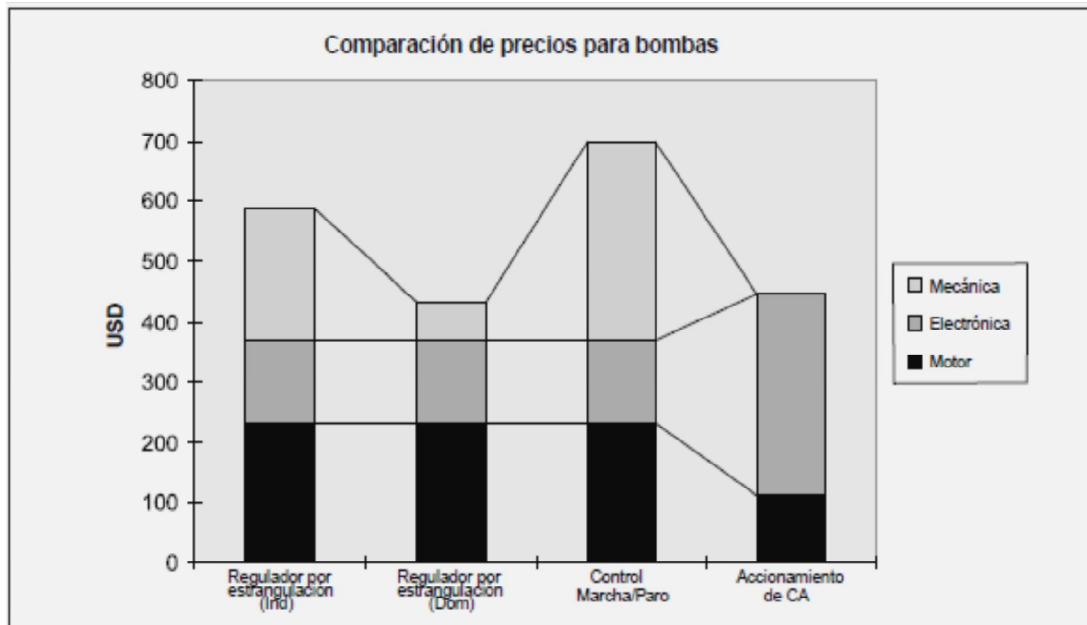


Fig. 4.42 Comparación de precios de bombas.

En la **fig. 4.42** se muestra la estructura de costes y el precio total de cada método de control de bombeo. La bomba es el único elemento que no se agrega a los costes porque su precio permanece invariable se utilice un accionamiento de CA o válvulas. En el sistema de regulación, existen dos posibilidades según si la bomba es de uso industrial o doméstico. En un entorno industrial existen requisitos más estrictos para las válvulas, lo cual representa un incremento de los costes.

Como puede observarse, el motor utilizado para los métodos tradicionales es mucho más costoso que el utilizado para el accionamiento de CA. Ello se debe a que el motor empleado para el accionamiento de CA es trifásico y, para los otros métodos tradicionales, monofásico.

El accionamiento de CA no requiere piezas mecánicas, con lo cual se reducen significativamente los costes. Las piezas mecánicas suelen ser menos costosas que el convertidor de frecuencia, pero debe agregarse el coste de las piezas eléctricas al coste total de la inversión.

Si se tienen en cuenta todos los costes, el accionamiento de CA suele ser la inversión más económica en comparación con otros métodos de control. Únicamente el sistema de regulación para uso doméstico tiene un coste reducido equivalente al del accionamiento de CA. No obstante, ello no representa el total de los costes, pues además de analizar el coste de la inversión, es necesario tener en cuenta los costes de instalación y de operación.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

| | Regulador estrang. | Accionamiento CA |
|--|--------------------------|-------------------------|
| Material instalación | 20 USD | 10 USD |
| Trabajo instalación | 5h x 65 USD = 325 USD | 1h x 65 USD = 65 USD |
| Trabajo de puesta en marcha | 1h x 65 USD = 65 USD | 1h x 65 USD = 65 USD |
| Total | 410 USD | 140 USD |
| Ahorro en la instalación: 270 USD | | |

fig. 4.43 comparativo costos de instalación.

Dado que, después del accionamiento de CA, el regulador por estrangulación es la segunda inversión menos costosa, compararemos los costes de instalación y funcionamiento de este último con los del accionamiento de CA. Tal como mencionamos anteriormente, en el regulador por estrangulación existen componentes eléctricos y mecánicos, por lo cual se requiere el doble de material para la instalación (**fig. 4.43**).

La instalación del regulador por estrangulación también representa el doble de trabajo que la del accionamiento de CA.

Instalar una válvula mecánica en un tubo no es tan sencillo y, además, el tiempo de instalación aumenta. Para que una válvula mecánica esté lista para usar suelen ser necesarias unas cinco horas, mientras que sólo se precisa una hora para dejar en estado de funcionamiento el accionamiento de CA. Si se multiplica el tiempo por el coste de una hora de trabajo de un instalador especializado, se obtiene el coste total de la instalación.

La puesta en marcha de un regulador por estrangulación no suele precisar más tiempo que el de un sistema de accionamiento de CA. En ambos casos el tiempo requerido es de una hora. Ahora podemos resumir el total del coste de instalación. Tal como hemos visto, con el accionamiento de CA puede ahorrar hasta 270 dólares USA por instalación. Por tanto, incluso si los costes de inversión del sistema de regulación fueran inferiores al precio de un motor monofásico (aproximadamente 200 dólares USA), el accionamiento de CA se amortizaría incluso antes de ponerlo en marcha un segundo.

Capítulo 4. Métodos de arranque

| | Regulador por estrang. | Accionam. CA ahorro del 50% |
|---|-----------------------------------|--|
| Potencia requerida | 0.75 kW | 0.37 kW |
| Energía anual 4000 horas/año | 3000 kWh | 1500 kWh |
| Coste de energía por 0.1 USD/kWh | 300 USD | 150 USD |
| Mantenimiento/año | 40 USD | 5 USD |
| Coste total/año | 340 USD | 155 USD |
| Ahorro en un año: 185 USD | | |

Fig. 4.44 Comparativo ahorro de energía.

Un amplio número de estudios y experimentos demuestran que es posible ahorrar un 50% de energía con un accionamiento de CA. Esto significa que un sistema de regulación requiere 0,7 kW de energía y un accionamiento de CA 0,37 kW. Si se utiliza una bomba 4000 horas al año, el sistema de regulación necesitaría 3000 kWh, mientras que el accionamiento de CA consumiría 1500 kWh de energía anual.

Para calcular el ahorro, se multiplica el consumo de energía por el precio de la energía, que variará según el país. En este caso hemos utilizado la tarifa de 0,1 dólares USA por kWh. Tal como se ha mencionado anteriormente, las piezas mecánicas sufren un gran desgaste y por ello requieren un mantenimiento frecuente. Se calcula que los costes de mantenimiento del sistema de regulación ascienden a 40 dólares USA anuales, mientras que los del accionamiento de CA representarían 5 dólares USA. En muchos casos, un convertidor de frecuencia no precisa mantenimiento (**fig. 4.44**).

Por tanto, el ahorro total en costes operativos ascendería a 185 dólares USA, lo cual representa casi la mitad del precio de un convertidor de frecuencias para esta gama de potencia.

Ello significa que el período de amortización de un convertidor de frecuencias es de dos años. Por tanto, en lugar del coste anual de mantenimiento de una válvula vieja, quizá sea más rentable cambiar a un sistema de control con accionamiento de CA. El período de amortización para la readaptación de un regulador existente es de dos años.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

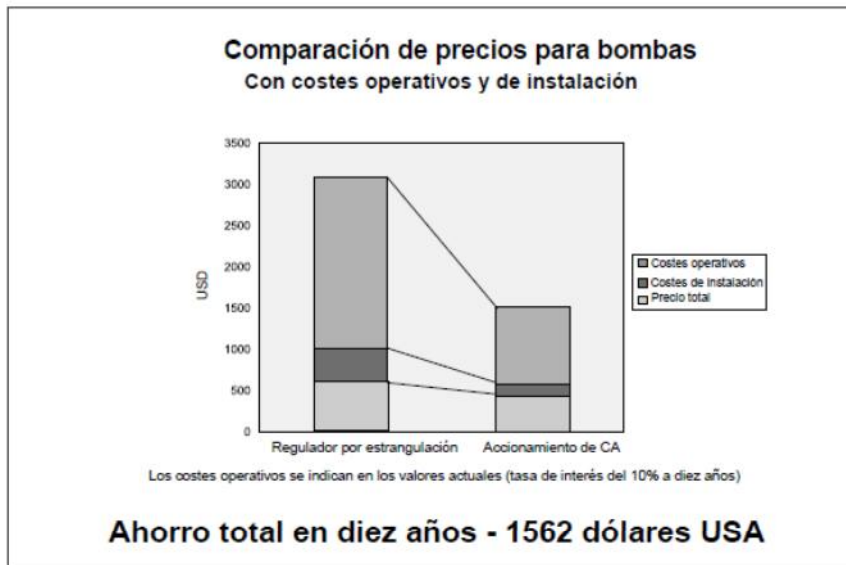


Fig. 4.45 Ahorro en diez años.

En la **fig. 4.45** se resumen todos los costes. El período habitual para el cálculo del coste operativo de una inversión de esta clase suele ser de 10 años. En este caso, los costes operativos se han calculado al valor actual con un 10% de tasa de interés .

A largo plazo, el coste de un método convencional es el doble que el de un convertidor de frecuencia. La mayor parte del ahorro que representa un accionamiento de CA se debe a los costes operativos y, en especial, al ahorro de energía, mientras que en la instalación puede observarse el mayor ahorro individual. Este ahorro es patente tan pronto como se instala el accionamiento.

Si se tiene en cuenta el ahorro total, es muy difícil comprender por qué sólo el 3% de los motores vendidos disponen de un convertidor de frecuencia. El objetivo de esta guía era presentarles las ventajas del accionamiento de CA y explicar las razones por las que en ABB pensamos que este es el mejor método para controlar sus procesos.

DTC Direct torque control

Para entender la respuesta a esta pregunta tenemos que entender que la función básica de un accionamiento de velocidad variable (VSD) es controlar el flujo de energía de la red eléctrica en el proceso.

La energía se suministra al proceso a través del eje del motor. Dos cantidades físicas describen el estado de eje: el par y velocidad. Para controlar el flujo de energía se deben de controlar estas cantidades.

En la práctica, ninguno de los dos se controla y se habla de "Control de par" o "control de velocidad". Cuando el VSD opera en el modo de control del par, la velocidad se determina por la carga. Del mismo modo, cuando se opera en el control de velocidad, el par de torsión se determina por la carga.

Inicialmente, motores de corriente continua se utilizaron como VSD porque podría fácilmente lograr la velocidad y el par requerido sin la necesidad de electrónica sofisticada.

Sin embargo, la evolución de la tecnología de control de velocidad variable de CA ha sido impulsada en parte por el deseo de emular el excelente rendimiento del motor de corriente continua, tal respuesta de par rápido y de precisión de la velocidad a bajo costo y libre de mantenimiento en motores de corriente alterna.

Variadores AC usando control PWM

Control de lazo para un variador de frecuencia AC usando PWM (fig. 4.46)

Características

- Variables de control: tensión y frecuencia.
- Simulación de la variable de CA de la onda sinusoidal utilizando modulador
- Flux proporcionado con relación constante V/f
- Unidad de lazo abierto
- La carga manda el nivel del par

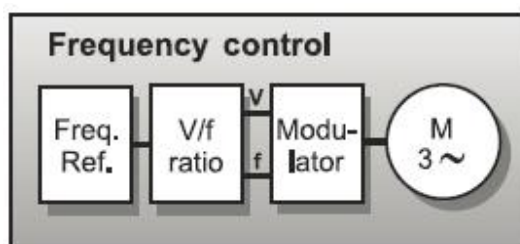


Fig. 4.46 Control por lazo.

A diferencia de un accionamiento de CC, la técnica de control de frecuencia de un variador de CA utiliza parámetros generados fuera del motor como el control variables, como son tensión y frecuencia.

Tanto la tensión y la frecuencia de referencia se introducen en un modulador que simula una onda senoidal alterna y la inyecta al motor de devanados del estator. Esta técnica se llama modulación PWM

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

(PWM) y utiliza el hecho de que hay un diodo rectificador hacia la red eléctrica y el voltaje de CC intermedio se mantiene constante.

El inversor controla el motor en la forma de un tren de impulsos PWM dictando la tensión y frecuencia.

Significativamente, este método no utiliza un dispositivo de retroalimentación que toma mediciones de la velocidad o posición del eje del motor y alimenta estos de nuevo en el lazo de control.

Tal disposición, sin un dispositivo de retroalimentación, se denomina "Unidad de lazo abierto".

Ventajas

- Bajo costo
- No hay ningún dispositivo de retroalimentación necesaria-sencillo.

Porque no hay ningún dispositivo de retroalimentación, el principio de control ofrece un bajo costo y solución simple para un control económico en motores de inducción ac.

Este tipo de unidad es adecuada para aplicaciones que no requieren altos niveles de medición o de precisión, tales como bombas y ventiladores.

Inconvenientes

- La orientación del campo no se utiliza
- El estado del motor es ignorado
- El par no se controla

Con esta técnica, conocida a veces como control escalar, la orientación de campo del motor no se utiliza. En lugar de ello, la frecuencia y el voltaje son las principales variables de control y se aplican a los devanados del estator. El estado del rotor se ignora, lo que significa que no hay velocidad o señal de posición que retroalimente.

Por lo tanto, el par no se puede controlar con algún grado de precisión. Además, la técnica utiliza un modulador que básicamente baja la comunicación entre la señal entrante de voltaje y de frecuencia y la necesidad de que el motor pueda responder a una señal de cambio.

Variadores AC- usando un control PWM Flux vector (fig. 4.47)

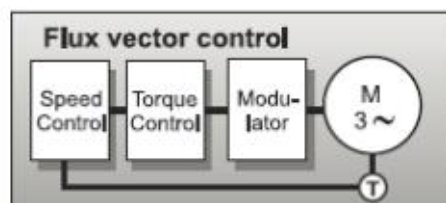


Fig. 4.47 Diagrama PWM flux vector.

Capítulo 4. Métodos de arranque

Lazo de control para un variador AC con control flux vector usando PWM

Field-oriented control - simulates DC drive (Control orientacion-campo simula a un variador de CD)

- Características eléctricas del motor son simuladas- “motor modelo”
- Unidad de lazo cerrado
- Control de torque indirectamente.

Para emular las condiciones de funcionamiento magnético de un motor de corriente continua, es decir, para llevar a cabo el proceso de orientación de campo, la unidad de flujo de vector necesita saber la posición angular espacial del flujo del rotor dentro del motor de inducción AC.

Con los variadores PWM flux vector, la orientación de campo se logra mediante la electrónica significa más bien que el conmutador mecánico / ensamble de escobillas del motor de DC.

En primer lugar, la información sobre el estado del rotor se obtiene mediante la retroalimentación de la velocidad del rotor y la posición angular con respecto al campo del estator por medio de un generador de impulsos. Un variador que usa un encoder de velocidad es conocido como un variador “closed-loop drive” (variador de lazo cerrado). También las características eléctricas del motor son matemáticamente modelado con microprocesadores utilizados para procesar los datos.

El controlador electrónico de un variador flux vector crea cantidades eléctricas tales como el voltaje, corriente y frecuencia, que son las variables de control, y se retroalimenta a través de un modulador de al Motor de inducción de CA. El Torque, por lo tanto, es controlado indirectamente

Ventajas

- Buena respuesta al torque.
- Control preciso de la velocidad.
- Par completo a velocidad “0”.
- Rendimiento cercano a un variador de DC
-

El control Flux vector alcanza par máximo a velocidad cero, dándole una actuación muy cercana a la de una unidad de DC.

Desventajas

- Necesita retroalimentación
- Costoso
- Necesita un modulador

Para lograr un alto nivel de respuesta de par y precisión de la velocidad, se requiere un dispositivo de retroalimentación. Esto puede ser costoso y también añade complejidad al motor de inducción tradicional de CA tradicional

Además, se utiliza un modulador, lo que entorpece la comunicación entre la tensión de entrada y la señal de frecuencia, para que el motor pueda responder a esta señal de cambio.

Aunque el motor es mecánicamente simple y variador es eléctricamente complejo.

Variador AC- Control de torque directo DTC. Fig. 4.48

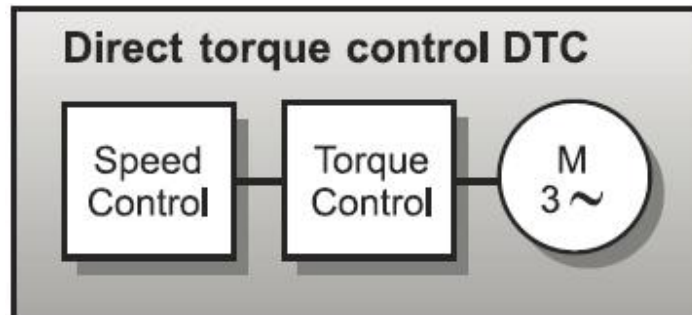


Fig. 4.48 Diagrama DTC.

Control loop of an AC drive using DTC

Variables de control con la tecnología DTC revolucionaria desarrollada por ABB, la orientación del campo se consigue sin tener una retroalimentación usando la teoría de motor avanzado para calcular el torque directamente y sin necesidad de utilizar un modulador. Las variables de control son el flujo de magnetización del motor y el par del motor.

Con el DTC no es necesario un modulador y no hay necesidad de un tacómetro o un encoder que retroalimente la velocidad o posición del eje del motor.

DTC procesa más rápido las señales digitales disponibles y más avanzado con una comprensión matemática de cómo el motor trabaja.

El resultado es un variador con una respuesta de par de torsión que es típicamente 10 veces más rápido que cualquier variador de CA o CC. La precisión de la velocidad dinámica de un DTC serán 8 veces mejor que cualquier variador de lazo abierto de CA y comparable a una un variador de DC que utiliza retroalimentación.

El DTC convierte al variador "universal" con la capacidad de realizar un trabajo de un variador de ca igual al de cc.

Comparativo de los variadores de velocidad

Vamos a revisar más de cerca a cada uno de los bloques de control y detectar algunas diferencias.

La primera observación es la similitud entre el bloque de control de la unidad de DC (fig. 4.47) y la de DTC (Fig. 4.48).

Ambos están usando los parámetros del motor para controlar directamente el torque.

Capítulo 4. Métodos de arranque

Pero el DTC tiene beneficios adicionales incluyendo que no necesita dispositivo de retroalimentación; todas las ventajas de un motor de CA; y no se necesita excitación externa.

| DRIVE | CONTROL VARIABLES |
|-----------------------|---|
| DC DRIVES | Armature Current, I_A Magnetising Current, I_M |
| AC DRIVES (PWM) | Output Voltage, U Output Frequency, f |
| Direct Torque Control | Motor Torque, T Motor Magnetising Flux, Ψ |

Fig. 4.49 comparativo unidad de CC vs DTC

Como puede verse la fig. 4.49, las dos unidades de CC y los accionamientos DTC utilizan parámetros reales del motor para controlar el par y la velocidad. Por lo tanto, el rendimiento dinámico es rápido y fácil. También con DTC, para la mayoría aplicaciones, no se necesita tacómetro o encoder para retroalimentar una señal de velocidad o posición.

Comparando DTC (fig. 4.48) con el control de los variadores AC (Fig. 4.46) muestra varias diferencias, la principal es que no se requiere modulador con el DTC.

Con los variadores PWM de CA, las variables de control son la frecuencia y voltaje que necesita pasar por varias etapas antes de ser aplicada al motor. Por lo tanto, con el control de los accionamientos PWM se manejan dentro del controlador electrónico y no en el interior del motor.

Comparativo métodos de arranque electromecánico vs estado solido

Ya analizamos los métodos mas utilizados en los últimos años:

- 1.- Arrancador a tensión plena
- 2.- Arrancador estrella delta
- 3.- Autotransformador
- 4.- arrancador suave
- 5.- variador de velocidad

Pero para seleccionar cual es el indicado tomemos en cuenta la figura **4.50**, en la cual la aplicación define el accionamiento.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

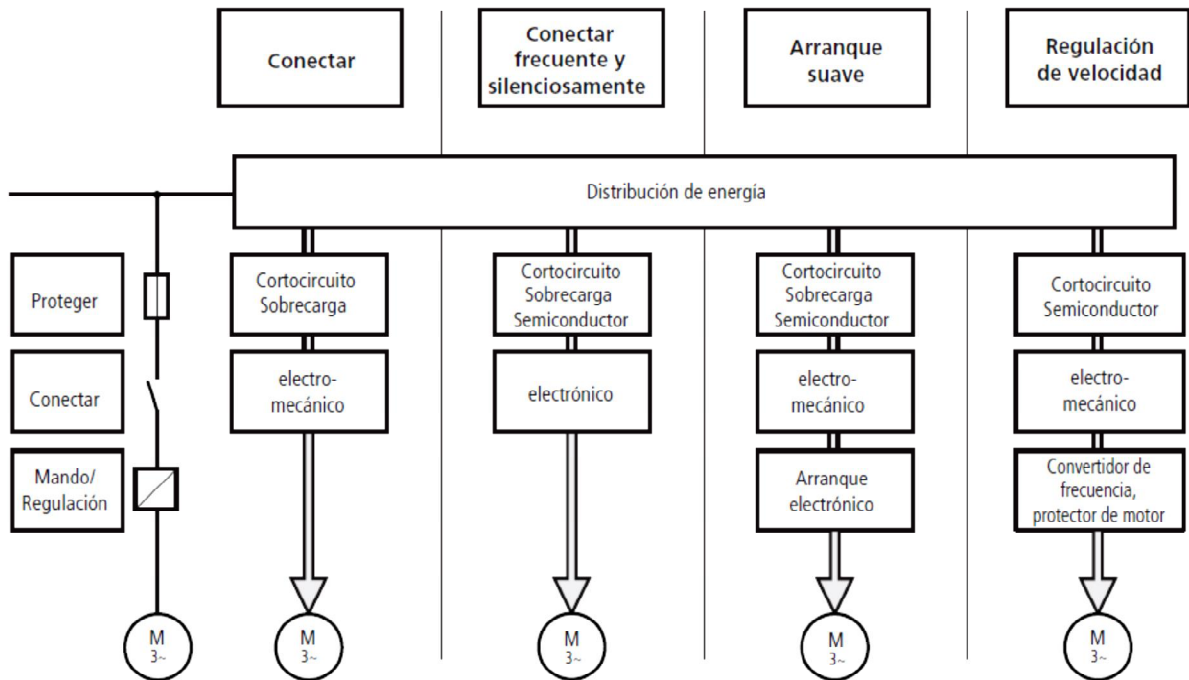


Fig. 4.50 accionamiento

Por lo que cualquier método de arranque a utilizar debe tener sus consideraciones antes de seleccionar el más adecuado para la aplicación, aunque los arrancadores de estado sólido tienen mayores beneficios que los arrancadores electromecánicos, de acuerdo a la fig. 4.51 ya que muchas de las protecciones ya vienen inmersas en el equipo y son configurables de acuerdo a la aplicación (molinos, bombas centrifugas, elevadores, escaleras, transportadores, bombas de vacío, ventiladores, etc.)

Aunque se tiene que tener especial cuidado al momento de seleccionar el arrancador de estado sólido ya que un arrancador suave tiene sus limitantes de aplicaciones, y en los mismos variadores hay diferentes tipos como lo comentamos anteriormente.

Capitulo 4. Métodos de arranque .

| Arranque | | Electromecánicos | | Estado sólido | | |
|----------|--------------|----------------------------|---------------------------|------------------|-----------------------|---------|
| | | ATP | Arrancador estrella delta | arrancador suave | variador de velocidad | |
| 1 | PROTECCIONES | corto circuito | si | Si | externo | externo |
| 2 | | sobrecarga | si | Si | si | si |
| 3 | | rotación inversa | externo | Externo | si | si |
| 4 | | rotor bloqueado | externo | Externo | si | si |
| 5 | | atascamiento | externo | Externo | si | si |
| 6 | | falla de fase | externo | Externo | si | si |
| 7 | | secuencia de fase | externo | Externo | si | si |
| 8 | | desbalanceo de fase | externo | Externo | si | si |
| 9 | | baja corriente | externo | Externo | si | si |
| 10 | | bajo voltaje | externo | Externo | si | si |
| 11 | | alto voltaje | externo | Externo | si | si |
| 12 | | sobretensión | externo | Externo | si | si |
| 13 | | Contactos auxiliares | externo | Externo | si | si |
| 14 | | Baja corriente al arranque | externo | Externo | si | si |
| 15 | | Arranque suave | externo | Externo | si | si |
| 16 | | Parada suave | externo | Externo | si | si |
| 17 | | Programación | externo | Externo | si | si |
| 18 | | Entradas/salidas digitales | externo | Externo | si | si |
| 19 | | recetas configuradas | no | No | si | si |
| 20 | | Variación de velocidad | no | No | no | si |
| 21 | | Control PID | no | No | no | si |
| 22 | | Comunicación | no | No | si | si |
| 23 | | Alto torque en velocidad 0 | no | No | no | si |

Fig. 4.51 Comparativo.

Por Ejemplo:

1.- Se requiere arrancar un motor de 20 hp a 440 Vca, para una bomba centrífuga, que va a llenar un depósito, que método de arranque es el más óptimo?

R.- al tratarse de una bomba debemos de considerar lo siguiente:

- a) no puede arrancar en sentido inverso (rotación inversa);
- b) se debe de tratar de mitigar o eliminar el golpe de ariete (rampa de arranque/paro);
- c) no debe de trabajar en vacío (baja corriente);

De las consideraciones y con ayuda de la fig. 4.51, vemos que los arrancadores electromecánicos no cumplen; por lo que se tiene que ocupar un arrancador de estado sólido, y el más idóneo es el arrancador suave.

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

2.- Se necesita arrancar un motor de 5 hp acoplado a un moto reductor para una banda transportadora, seleccionar el método de arranque mas optimo?

R.- como el motor no necesita variar la velocidad ya que esta acoplado a un moto reductor, el equipo idóneo es un electromecánico aunque también los de estado sólido también se pueden usar, entonces por la capacidad y precio seria un arrancador a tensión plena.

3.- Se necesita arrancar un elevador de personas, el cual tiene un motor de 15 hp, que método de arranque es el más idóneo?

R.- para esta aplicación debemos de considerar lo siguiente:

- a) Cambio de sentido de rotación
- b) rampa de arranque/paro suave
- c) variación de velocidad por PID
- d) Alto torque a baja frecuencia

De acuerdo a estas consideraciones es una aplicación pura para el variador de velocidad.

5. Conclusiones

Para poder arrancar un motor se deben de tener muchas consideraciones

- Voltaje
- Capacidad del motor
- Aplicación
 - Normal
 - Media
 - Pesada

Y sobre todo que tan crítico es este motor en el proceso, ya que en algunas empresas parar unos minutos son pérdidas incalculables y no se digan horas, por ejemplo, tener un paro no programado de un horno el cual trabaja 24 horas y 365 días del año, conlleva a perder aproximadamente una semana de producción. Ahora una bomba sumergible la cual está a más de 500 metros de profundidad el solo hecho de sacarla para hacer una revisión ya es un gasto, así podemos enumerar muchas aplicaciones.

De aquí la necesidad de conocer los diferentes métodos de arranque, ya que para las aplicaciones antes mencionadas no se recomiendan los arrancadores a tensión plena, sino un arrancador suave o un variador de velocidad, de tal forma que para motores de 15 hp se debe de ocupar un arrancador de estado sólido, ya que tener conectado un motor mayor de 15 hp en un arranque a tensión plena se tienen los siguientes inconvenientes.

- Consumo de hasta 7 veces la corriente nominal del motor al arranque.
- Baja el voltaje de suministro al arranque.
- desgaste de las partes mecánicas y en algunas ocasiones fracturas de en dicho acoplamiento.
- Multas.

Esto entre los más notables, por tal motivo hay que seleccionar un arrancador de estado sólido y aquí el dilema de que es mejor un arrancador suave o un variador? La respuesta es sencilla contestando lo siguiente:

1.- ¿Se tienen que variar la velocidad en cualquier momento del proceso?

2.- ¿Se necesita alto torque en velocidad "0"?

Si se contestó un "sí" de cualquiera de las dos preguntas anteriores se requiere un variador de velocidad ya que ni el arrancador a tensión plena, ni los arrancadores suaves son capaces de variar la velocidad y mucho menos tener alto torque en velocidad "0", cualquiera de estos equipos ya cuentan con protecciones para el motor como:

- Baja o alta tensión
- Baja o alta corriente
- Sobrecarga
- Corto circuito

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .

- Secuencia de fase
- Temperatura
- Desbalanceo de voltaje y corriente
- Máximo de arranques
- Pre alarma.

Y cuentas con las siguientes prestaciones

- Pantalla
- Consumo de corriente
- Lectura:
 - Voltaje
 - Corriente
 - Factor de potencia
 - Frecuencia
 - Potencia activa, aparente y reactiva
 - Arranques
 - Fallas
 - Pre alarmas
 - Picos de tensión o corriente.
- Comunicación

Con esto podemos concluir que el método de arranque de cualquier motor va a ser en base a la aplicación y la importancia de este en el proceso.

En base a esto se cumplieron con los objetivos planteados al inicio del trabajo.

6. Bibliografía.

**1.- Manual de Motores Eléctricos
Grupo WEG- Unidad de motores
Jaragua do Sul-SC-Brasil 2014**

**2.- Básicos de Electricidad
Rockwell Automation
Unidad Industrial Control
2008**

**3.-Technical guide book
ABB drives 2013**

**4.- Instalaciones Eléctricas
Baja tensión
Eaton**

**5.- Protección de motores eléctricos
Baja tensión
Eaton**

**6.- Elements Of Electronic Drives
J.B. Gupta
Rajeev Manglik
Rohit Manglik
S.K. KATARIA & SONS 2014**

**7.- Fundamentals of Electric Drives and Control
Dr. B. R. Gupta
V. Shingal
S.K. KATARIA & SONS 2014**

8.- Manual de operación Soft starter ABB

Comparativo de los sistemas de control electromecánico con los de estado sólido .