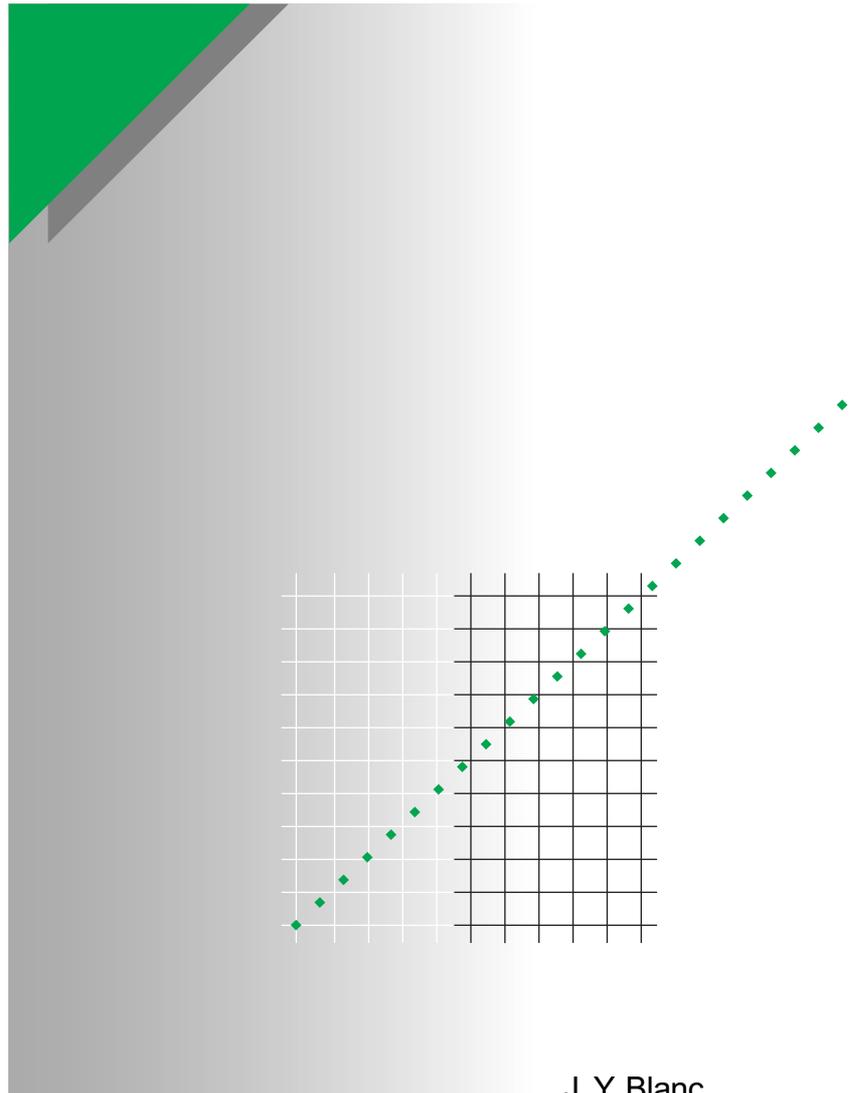


Cuaderno Técnico nº 165

Control, mando y protección de motores AT



- Merlin Gerin**
- Modicon**
- Square D**
- Telemecanique**

J. Y. Blanc

La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas.

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:

<http://www.schneiderelectric.es>

Igualmente pueden solicitarse ejemplares en cualquier delegación comercial de **Schneider Electric España S.A.**, o bien dirigirse a:

Centro de Formación Schneider
C/ Miquel i Badia, 8 bajos
08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80

Fax: (93) 219 64 40

e-mail: formacion@schneiderelectric.es

La colección de **Cuadernos Técnicos** forma parte de la «Biblioteca Técnica» del **Grupo Schneider**.

Advertencia

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 165 de Schneider Electric».



J.Y. BLANC

Diplomado Ingeniero SUPELEC en 1 979, entra en Merlin Gerin en 1 981, como Ingeniero de estudios sobre dieléctricos en MT.

Siempre en la división de MT, pasa a ser jefe de proyecto de desarrollo de equipos y centros de transformación primarios de la gama FLUAIR y después de interruptores automáticos de protección con bloques con SF.

Actualmente es responsable del desarrollo de interruptores automáticos y equipos primarios de MT.

cuaderno técnico nº 165

Control, mando y protección de los motores AT

Por: J. Y. Blanc

Trad.: Dr. M. Cortes

Edición francesa: diciembre 1 992

Versión española: mayo 1 996

Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Schneider
 **Electric**

Control, mando y protección de los motores AT

Índice

1 Repaso sobre los diferentes tipos de motores de ca	Motores asíncronos de jaula de ardilla	p. 5
	Motores asíncronos de rotor bobinado	p. 7
	Motores síncronos	p. 7
	Tolerancias de dimensionamiento	p. 8
	Tensiones toleradas y ensayos dieléctricos	p. 8
2 Procedimientos clásicos de arranque en AT	Arranque estatórico directo a plena tensión	p. 10
	Arranque estatórico con tensión reducida	p. 10
	Arranque estatórico por condensadores	p. 12
	Arranque rotórico	p. 12
	Elección del modo de arranque	p. 13
3 Aparata de control y mando	Soluciones electromecánicas	p. 16
	Soluciones electrónicas	p. 19
4 Protección de los motores AT	Principales tipos de defectos	p. 22
	Principios de protección	p. 22
	Evolución tecnológica	p. 26
Anexo 1: Determinación del modo de arranque de un motor	Hipótesis de cálculo	p. 27
	Método general	p. 27
Anexo 2: Coordinación de las protecciones		p. 30

En la industria y el gran sector terciario, la potencia unitaria de las máquinas rotativas excede a menudo de los 100 kW; cuando se da este caso y/o la longitud de la línea de alimentación es importante (caída de tensión, pérdidas) resulta conveniente utilizar motores de alta tensión.

El objetivo de este Cuaderno Técnico es dar una información actualizada sobre estos motores, sus sistemas de arranque y las distintas protecciones utilizables; todo ello con la finalidad de facilitar las técnicas a elegir.

1 Repaso de los diferentes tipos de motores de ca

Los motores de corriente alterna, tanto de alta como de baja tensión ofrecen una gran variedad de características eléctricas, dinámicas y tecnológicas. No obstante, dejando aparte una pequeña parte de motores especiales con aplicaciones específicas, se puede establecer una clasificación en tres familias:

- motores asíncronos de jaula de ardilla,
- motores asíncronos de rotor bobinado,
- motores síncronos.

Y se diferencian además, entre otras, por:

- los valores del par y de la corriente de arranque,
- la variación de la velocidad en marcha normal,
- los valores del factor de potencia y del rendimiento en función de la carga.

Los motores de AT se alimentan con una tensión que rara vez excede de 7,2 kV; su potencia va de 100 kW a más de 10 MW, siendo 800 kW la potencia media.

Motores asíncronos de jaula de ardilla

Estos motores de AT son de dos tipos principales según la constitución del rotor que puede ser de jaula sencilla o de doble jaula.

Esto permite elegir las características del par y de la intensidad de arranque:

- los rotores de simple jaula de ardilla tienen:
 - un par de arranque relativamente débil (0,6 a 1 C_n),
 - un par máximo del orden de 2 a 2,2 C_n ,
 - una intensidad de arranque que varía de 4,5 a 5,5 I_n ,

(C_n : par nominal, I_n corriente nominal).

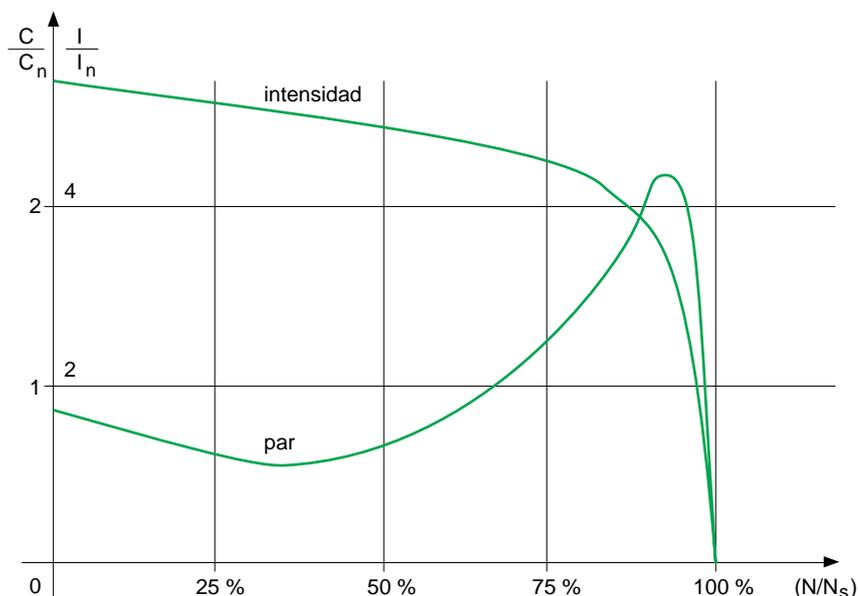


Fig. 1: Curvas $C(N)$ e $I(N)$ de un motor asíncrono de jaula sencilla.

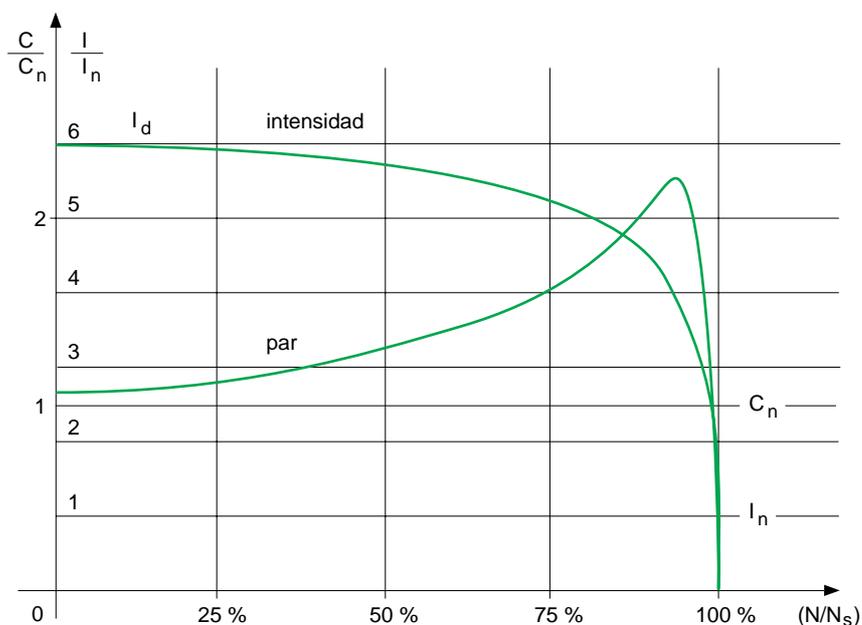


Fig. 2: Curvas $C(N)$ e $I(N)$ de un motor asíncrono de doble jaula.

■ los rotores de doble jaula, o los rotores de ranuras profundas tienen:

- un par de arranque ligeramente más elevado (0,8 a 1,2 C_n),
- un par máximo del orden de 2 a 2,2 C_n (un poco más alto en el caso de ranuras profundas),
- una intensidad de arranque que varía de 5 a 6,5 I_n .

Las **figuras 1 y 2** nos dan las curvas de par en función de la velocidad (N/N_s).

Hay que observar que:

■ los motores de jaula simple presentan un par mínimo (0,5 a 0,6 C_n), en tanto que los motores de doble jaula o de ranuras profundas presentan una curva de par, en función de la velocidad, continuamente creciente hasta el par máximo.

■ el empleo de estos motores es muy indicado para los usos intensivos y en atmósferas peligrosas, como consecuencia de:

- la simplicidad del diseño de sus rotores en cortocircuito, lo que les confiere una gran robustez mecánica y eléctrica,
- de la ausencia de escobillas.

Estas dos particularidades conducen a un mantenimiento de lo más reducido.

Las características de par de los motores asíncronos de jaula están particularmente bien adaptadas a máquinas tales como: las bombas centrífugas, compresores, grupos convertidores, máquinas-herramientas y ventiladores.

Sin embargo, un inconveniente inherente a todos estos motores, reside en su factor de potencia, relativamente bajo, del orden de 0,8 a 0,9 a plena carga, y que disminuye cuando se trabaja a poca carga (**figura 3**).

Si la potencia instalada en motores asíncronos es importante, es necesario instalar una compensación de la energía reactiva con baterías de condensadores. Esta instalación puede ser: global, por grupo de motores o por motor (grandes unidades).

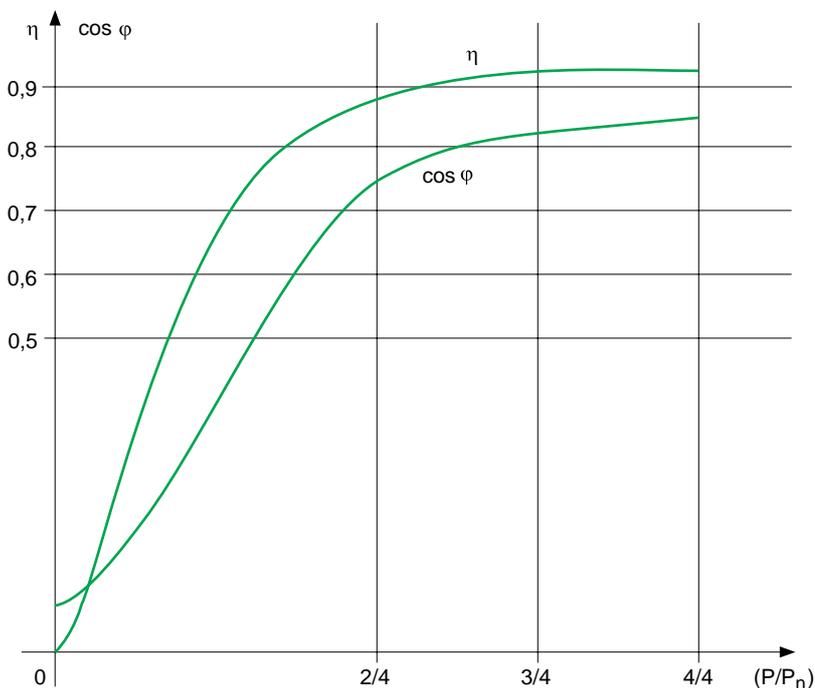


Fig. 3: Curvas rendimiento η (P) y factor de potencia $\cos \varphi$ (P) de un motor asíncrono de doble jaula.

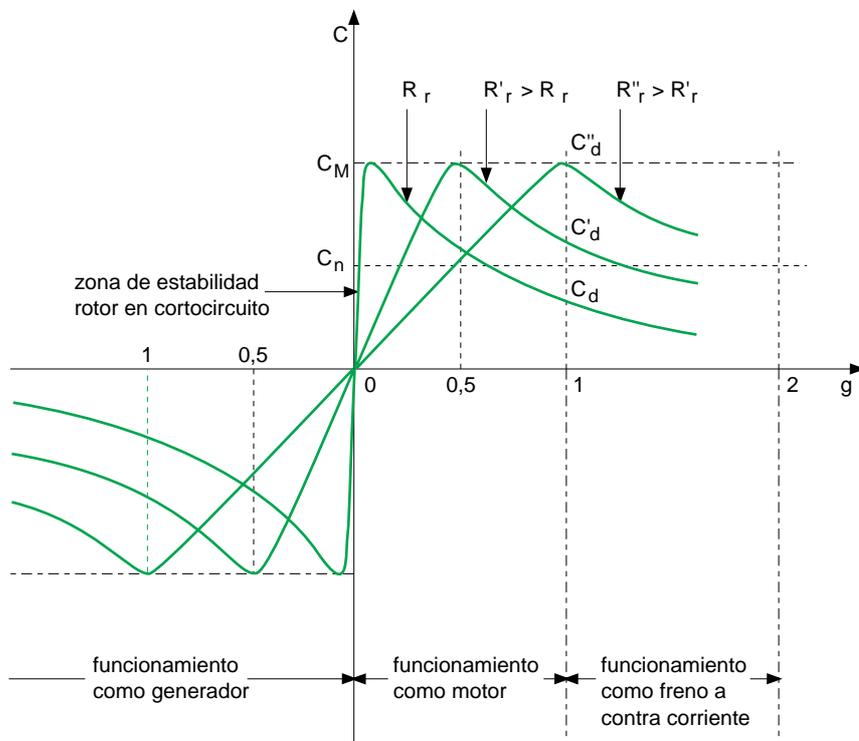


Fig. 4: Curva $C(g)$ de un motor asíncrono de rotor blindado.

Motores asíncronos de rotor bobinado

A causa de que estos motores tienen un arrollamiento rotórico conectado a los anillos rozantes, la resistencia de este circuito puede ser modificada introduciendo resistencias externas.

En la zona de estabilidad del motor, que corresponde a la pendiente positiva de la curva $C = f(g)$ (figura 4), el deslizamiento «g» es proporcional a la resistencia rotórica:

$$g = \frac{1}{A} R_r \cdot C$$

$$\text{con } g\% = \frac{N_s - N}{N_s} \cdot 100$$

en el que:

N_s : velocidad de sincronismo,

N : velocidad de funcionamiento.

$$A = 3 V^2 \cdot \frac{p}{\omega} \frac{M}{L_1} = \text{constante}$$

siendo:

V : tensión de fase de alimentación,

p : número de pares de polos,

ω : pulsación de la corriente de alimentación ($\omega = 2\pi f$),

M : inductancia mutua estator-rotor,

L_1 : autoinducción total del estator ($L_1 = M + L_s$),

R_r : resistencia rotórica = resistencia propia del rotor + resistencia exterior,

C : par motor.

Reduciendo la resistencia exterior en el curso del arranque se obtiene una traslación de la característica $C(g)$ y la adaptación del par de arranque al par de la máquina arrastrada. Nótese que el valor del par máximo es independiente de la resistencia rotórica.

Por otra parte, para deslizamientos reducidos, la corriente rotórica es inversamente proporcional a la resistencia rotórica. Su módulo viene dado por:

$$\frac{U_d}{U_n} \text{ siendo } B = V \cdot \frac{M}{L_1}$$

La corriente estática sigue la misma ley según la relación de transformación y la corriente magnetizante.

En consecuencia, la elección de la resistencia rotórica de arranque permite resolver prácticamente todos los problemas importantes de par en el arranque o de corriente de arranque sobre la red y conciliar estos dos imperativos. Las diferentes posibilidades de utilización de los motores asíncronos de rotor bobinado los hacen muy aptos para el accionamiento de máquinas de elevado par de arranque, tales como las machacadoras, malaxadores, cintas de transporte, etc.

Además, las máquinas que requieren un fuerte frenado a contracorriente utilizan igualmente este tipo de motores.

Al igual que los motores asíncronos de jaula, el factor de potencia en marcha normal es relativamente bajo; esta característica y la presencia de los anillos rozantes y de las resistencias rotóricas hacen que su empleo tienda a desaparecer en beneficio de los motores de doble jaula o de ranuras profundas.

La figura 4 representa las curvas características $C(g)$, según el valor de la resistencia rotórica así como las zonas de estabilidad. Estas curvas muestran el interés de introducir una resistencia importante en el circuito rotórico para obtener un frenado eficaz a contracorriente.

Motores síncronos

Las principales diferencias entre estos motores y los asíncronos son:

- velocidad constante (velocidad de sincronismo),
- el circuito rotórico se alimenta con corriente continua,
- el factor de potencia se puede regular con la corriente continua de excitación.

Tecnológicamente estos motores son idénticos a los alternadores.

Para obtener un par asíncrono y evitar las oscilaciones, los rotores están provistos de una jaula de amortiguación: esta jaula permite arrancar los motores síncronos, con

un débil par resistente, de una forma análoga a la de los motores asíncronos de simple jaula (pues tiene sensiblemente las mismas curvas características de par y de corriente de arranque). Durante el arranque, para evitar las sobretensiones en el circuito de excitación, a éste se le pone en paralelo una resistencia (shunt) cuyo valor se elige entre 5 y 10 veces la resistencia del circuito de excitación, y después se desconecta.

Dado que el par asíncrono tiende a cero cuando se aproxima a la velocidad de sincronismo, la sincronización al final del arranque de estos motores con la red no puede realizarse a la velocidad de sincronismo como es el caso de los alternadores.

Esto se traduce siempre en un régimen transitorio más o menos importante, según la velocidad adquirida al fin del arranque y la potencia del motor.

Para limitar este régimen transitorio se puede utilizar:

- o bien un relé que controla el deslizamiento por la medida de la frecuencia de la corriente rotórica que recorre la resistencia de arranque. Este relé cierra la alimentación del circuito de excitación en el momento en que el deslizamiento es mínimo.

Este dispositivo es prácticamente indispensable cuando el motor síncrono representa una fracción importante de la potencia total instalada.

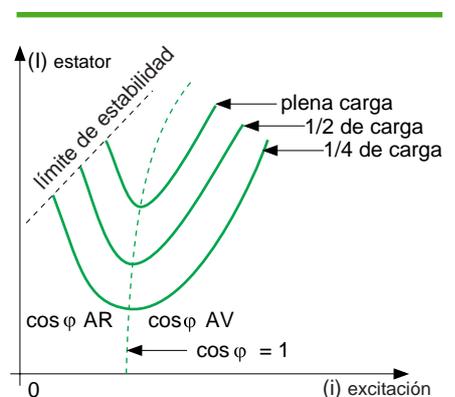


Fig. 5: Motor síncrono: curvas de Mordey.

■ o bien aplicar la corriente de excitación en dos tiempos, de forma automática o manual.

Las fuentes de excitación pueden estar, o bien separadas:

- grupo motor-excitatriz,
- rectificador a tiristores,

o bien emplazadas en el extremo del eje del motor,

- generador invertido,
- alternador invertido con «inducido y rectificador con disco giratorio de diodos».

Las técnicas que más se utilizan son el rectificador a tiristores y los «discos de diodos giratorios».

Este último medio elimina las escobillas, suprime el armario de excitación y además tiene a menudo un dispositivo de sincronización y de resincronismo en caso de ruptura de éste.

Estos motores son capaces de suministrar energía reactiva forzando la corriente de excitación. Es esta particularidad la que motiva su empleo, puesto que permite compensar las cargas reactivas de la red.

Las curvas de la **figura 5** muestran la variación de la corriente estatórica en

función de la corriente de excitación para una carga dada constante (curvas de Mordey). El empleo de este tipo de motores para las pequeñas potencias está poco extendido. Por el contrario, por encima de los 2 000 kW su empleo es frecuente debido a su buen rendimiento y a la posibilidad de variar su factor de potencia. Para los movimientos muy regulares el motor síncrono se impone; sin embargo las máquinas arrastradas deben tener un par resistente relativamente débil durante el arranque y el dimensionado de la jaula de amortiguación limita la cadencia de los arranques.

Tolerancias en el dimensionamiento

Las características electromecánicas de los motores vienen definidas por la norma CEI 34-1. Para ciertas magnitudes características asignadas, la norma define las tolerancias que debe respetar el constructor. Es de mayor interés conocer estas tolerancias, porque, para ciertas características del motor, esas tolerancias tienen una influencia directa en la elección de la

potencia del motor y de la aparatación, así como sobre la regulación de las protecciones.

La tabla de la **figura 6** da las tolerancias de las principales magnitudes características.

Tensiones toleradas y ensayos dieléctricos

Los motores, como los demás componentes de las redes eléctricas, están sometidos a diversas sobretensiones. Son particularmente sensibles a las sobretensiones de frente abrupto, de frecuencias elevadas, porque quedan «bloqueadas» por las primeras espiras de los devanados estatóricos.

Sobretensiones de maniobra

Son el resultado de fenómenos transitorios que aparecen a causa de cambios de estado de la red de alimentación.

Se deben de tomar en consideración los fenómenos que siguen, que son específicos de los circuitos inductivos y, por tanto, de los motores:

- eliminación súbita de la corriente al cortarla,

magnitud	tolerancia
motores asíncronos	
corriente con rotor bloqueado y en cortocircuito	+ 20% de la corriente garantizada (no hay límite inferior)
par con el rotor bloqueado	de - 15% a + 25% del par garantizado
par mínimo durante el arranque	- 15% del par garantizado para los motores de jaula $C_d \geq$ al tercio del par asignado y \leq a la mitad del par con el rotor bloqueado, y éste a plena tensión
par máximo	- 10% del par de reserva garantizado; después de aplicar esa tolerancia, el par se mantiene $\geq 1,6$ veces del par asignado
motores síncronos	
corriente con rotor bloqueado	+ 20% del valor garantizado
par con rotor bloqueado	de - 15% a + 25% del valor garantizado
par de pérdida de sincronismo	- 10% del valor garantizado; después de aplicar esa tolerancia el par queda $\geq 1,35$ veces el par asignado (1,5 para los motores síncronos de polos salientes)

Fig. 6: Tolerancias de las principales magnitudes características según la norma CEI 34-1.

■ reencendidos múltiples en la interrupción y precebados en el establecimiento de la corriente en el caso en que el aparato de corte sea capaz de abrir las corrientes de altas frecuencias que corresponden a estos fenómenos.

Sobretensiones de frente abrupto

Aparecen como resultado de caídas del rayo directas o indirectas; se propagan a lo largo de la red y determinan unas tensiones dieléctricas que, aún acotadas por el empleo de limitadores de sobretensiones, pueden ser importantes.

El estudio de las sobretensiones se desarrolla en el Cuaderno Técnico nº 151 «Sobretensiones y coordinación del aislamiento» y la sensibilidad particular de los motores en el Cuaderno Técnico nº 143 «Interruptores automáticos de SF₆ y protección de motores AT».

Para verificar la tensión soportada (o nivel de aislamiento) de los motores a estas diferentes sobretensiones, éstos se someten a ensayos de tipo, realizados según la norma CEI 34-1.

La tensión de ensayo se aplica entre el devanado que se pone a prueba y la carcasa de la máquina a la cual se conectan los circuitos magnéticos y todos los demás devanados estáticos y rotóricos.

Las normas prescriben dos tipos de ensayo: los ensayos a frecuencia industrial y los ensayos de choque.

Ensayos a frecuencia industrial

La tensión soportada a las sobretensiones de maniobra, de acuerdo con la norma CEI 71, se verifica con el ensayo de tensión soportada a frecuencia industrial. El ensayo se inicia con una tensión inferior a $U/2$ y va aumentándose progresivamente hasta el valor $2U + 1\ 000\ V$, nivel que se mantiene durante un minuto.

Para el estator, U es la tensión específica de alimentación. Para el rotor, U es la tensión que aparece, con el circuito rotórico abierto, cuando la tensión de alimentación especificada del estator se aplica mientras el rotor está bloqueado para girar. Si el motor es reversible (cambio del sentido de giro con el

motor lanzado), la tensión de ensayo aplicada al rotor será $4U + 1\ 000\ V$.

Ensayo de choque

Consiste en aplicar una onda de tensión representativa del rayo:

- tiempo de frente: $1,2\ \mu s$,
- tiempo de semiamplitud en la cola: $U_{\text{cresta}} / 2 : 50\ \mu s$,
- tensión de ensayo:
 $U_{\text{cresta}} = 4U + 5\ 000\ V$

Los devanados se someten a varias ondas de choque positivas y negativas.

Los ensayos de choque no son obligatorios en el estado actual de la normalización; pueden, en efecto, contribuir a un envejecimiento prematuro del aislamiento de las cabezas de bobina. Lo más normal es que los ensayos dieléctricos no deban de repetirse; si se efectúa un segundo ensayo, se llevará a cabo con el 80% de las tensiones indicadas anteriormente.

2 Procedimientos clásicos de arranque en AT

Los principales procedimientos de arranque de los motores de AT son los siguientes:

- arranque estatórico directo a plena tensión,
- arranque estatórico con tensión reducida por acoplamiento estrella-triángulo, por reactancias o por autotransformador,
- arranque estatórico por condensadores,
- arranque rotórico.

Arranque estatórico directo a plena tensión

Este método de arranque se emplea en los motores asíncronos con rotor de jaula y los motores síncronos.

La punta de corriente de arranque es del orden de 4 a 7 I_n , según las características del motor, y su duración puede variar de 1 a 10 segundos, aproximadamente, en función del momento de inercia total (motor + máquina), del par motor y del par resistente.

La utilización de este modo de arranque exige, pues, que la red pueda soportar esta sobrecarga de la corriente sin que resulten perturbados otros receptores y que la máquina arrastrada pueda soportar el choque mecánico debido al par motor y lo económico que resulta hacen que este método de arranque sea muy utilizado y aún aconsejado en la medida en que la caída de tensión en la red, durante el arranque, sea aceptable. El factor determinante es la relación de la potencia del motor a potencia de cortocircuito.

Arranque estatórico con tensión reducida

Arranque estrella-triángulo

Este método de arranque permite reducir:

- la corriente en la relación de $\sqrt{3}$,
- el par de arranque a 1/3.

Se utiliza en BT para potencias reducidas, pero raramente en AT, en razón de las importantes puntas de corriente cuando se pasa a la conexión triángulo. Se reemplaza por el arranque con reactancias.

Tensión reducida por resistencias

Muy empleada en BT, raras veces se emplea en AT, por las calorías disipadas y los problemas de aislamiento de las resistencias.

Tensión reducida por reactancias

Este modo de arranque (ver esquema de potencia de la **figura 7**) es el modo más simple de reducir la punta de corriente en la red; el par motor de arranque es pequeño y por ello las máquinas arrastradas deben tener un par resistente relativamente débil durante la fase de lanzamiento: compresores, bombas centrífugas, grupos convertidores, etc.

En efecto, el par de un motor asíncrono varía según el cuadrado de la tensión de alimentación, y la corriente absorbida es proporcional a esta tensión.

$$C'_d = C_d \left(\frac{U_d}{U_n} \right)^2$$

siendo:

C'_d : par de arranque a tensión reducida,

C_d : par de arranque con tensión nominal,

U_d : tensión de arranque,

U_n : tensión nominal de funcionamiento.

$$I'_d = I_d \frac{U_d}{U_n}$$

siendo:

I'_d : corriente de arranque con tensión reducida,

I_d : corriente de arranque con tensión nominal.

Estas relaciones se escriben también en valores relativos en base a las características nominales:

$$\frac{I'_d}{I_n} = \frac{I_d}{I_n} \cdot \frac{U_d}{U_n}$$

Las curvas de la **figura 7** dan las variaciones de las relaciones en función de la relación en función de la

relación $\frac{U_d}{U_n}$

La tensión en bornes del motor se aumenta progresivamente en el curso del arranque: el lanzamiento obtenido es suave.

- funcionamiento y esquema de principio

- primer tiempo

marcha con tensión reducida por el cierre de C_L : contactor de línea,

- segundo tiempo

marcha nominal por el cierre de C_C : contactor de cortocircuito.

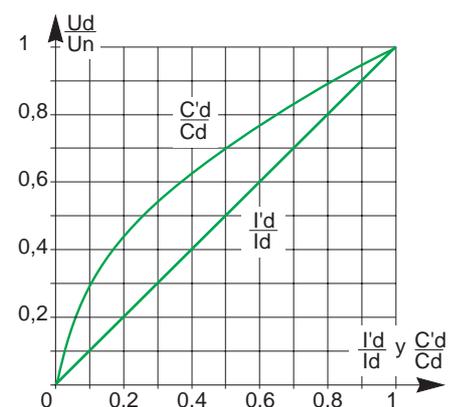


Fig. 7: Curvas de arranque bajo tensión reducida (por reactancia o estrella-triángulo).

■ determinación de la reactancia de arranque (figura 8).

La tensión de arranque viene determinada por la punta de corriente máxima I'_d permitida por la red:

$$U_d = U_n \cdot \frac{I'_d}{I_d}$$

La caída de tensión compuesta en la reactancia tiene por valor:

$$\vec{U}_n - \vec{U}_d = j \cdot \sqrt{3} \cdot L \cdot \omega \cdot \vec{I}'_d$$

El diagrama de la figura 9 muestra que esta relación puede escribirse aritméticamente para un motor asíncrono, porque el factor de potencia, en el primer instante del arranque, corresponde sobre todo al de la reactancia de arranque, de donde se deduce:

$$L \cdot \omega = \frac{U_n - U_d}{\sqrt{3} \cdot I'_d}$$

Para dimensionar en potencia la reactancia es necesario conocer el tiempo de arranque y la cadencia de maniobras.

Tensión reducida por autotransformador

Este método de arranque permite a veces conciliar la reducción de la punta de corriente sobre la red y el valor del par motor. En efecto, presenta la ventaja de reducir la punta de corriente de transformación:

$$\frac{I'_d}{I_n} = \frac{I_d}{I_n} \cdot \left(\frac{U_d}{U_n} \right)^2$$

$$\frac{C'_d}{C_n} = \frac{C_d}{C_n} \cdot \left(\frac{U_d}{U_n} \right)^2$$

siendo:

I'_d : corriente de arranque lado red a tensión reducida.

Estas relaciones permiten determinar el valor de la tensión reducida en función de la relación I'_d/I_d permitida en la red, y de la relación C'_d/C_n permitida por la máquina arrastrada.

La curva de la figura 10 da la variación de U_d/U_n en función de I'_d/I_d , o de C'_d/C_n .

■ funcionamiento y esquema de principio (figura 11)

C_L : contactor de línea,

C_C : contactor de cortocircuito,

C_{PN} : contactor de formación del punto neutro AT,

AT: autotransformador.

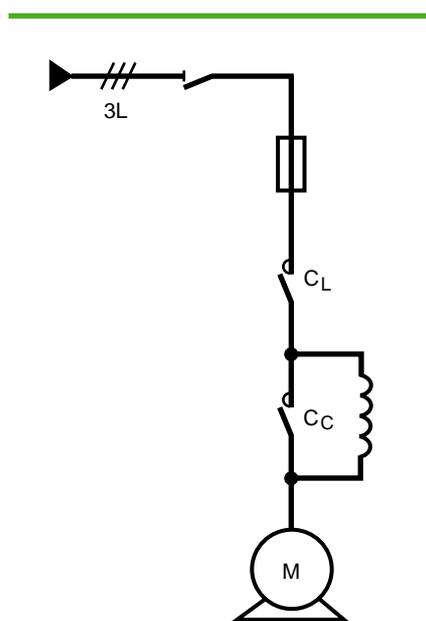


Fig. 8: Esquema de potencia: arranque por reactancia.

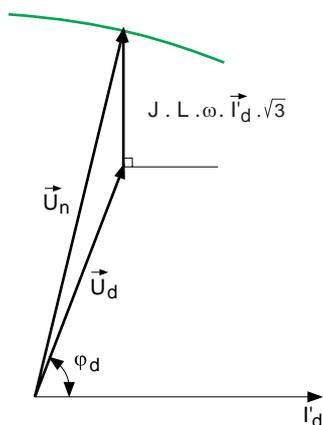


Fig. 9: Diagrama vectorial para la determinación de L.

□ primer tiempo

marcha a tensión reducida por el cierre de C_{PN} , que provoca el cierre de C_L ,

□ segundo tiempo

marcha con la inductancia, por la apertura de C_{PN} ,

□ tercer tiempo

marcha a tensión nominal por el cierre de C_C .

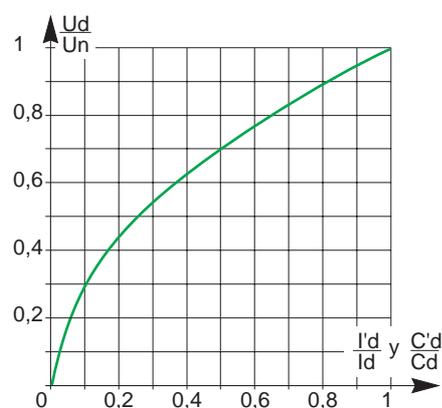


Fig. 10: Curva de arranque bajo tensión reducida por autotransformador.

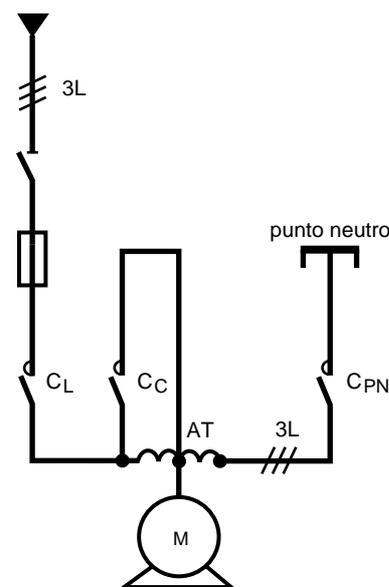


Fig. 11: Esquema de potencia: arranque por autotransformador.

Notas:

- el segundo tiempo, en principio, es corto (del orden de un segundo), pues la mayor parte de las veces, es un tiempo de amortiguamiento.

El empleo de autotransformadores con entrehierros reduce notablemente este defecto, pero necesita el conocimiento del valor de la corriente absorbida por el motor al final del primer tiempo,

- el paso a plena tensión se traduce siempre por un régimen transitorio más o menos importante según la velocidad adquirida al fin del primer tiempo y el valor de la corriente absorbida,

- la intensidad que llega al punto neutro en el arranque es la diferencia entre la corriente del motor y la corriente de línea o magnetizante en el autotransformador. Esto permite reducir el calibre del contactor de punto neutro C_{PN} .

- existe una variante de este esquema que suprime el contactor de punto neutro. Esta variante debe evitarse, pues el paso de la tensión reducida a la plena tensión obliga a cortar la conexión motor-red.

Teniendo en cuenta el tiempo relativamente corto de conmutación y de la tensión residual en los bornes del motor, una punta de corriente superior a la corriente de arranque se producirá, en efecto, en el paso a la marcha normal: condición inadmisibles para la red y para el motor con el riesgo de provocar la desconexión por las protecciones.

Arranque estático por condensadores

Este procedimiento permite conservar las características del arranque a plena tensión del motor. Es particularmente utilizado para conservar el par de arranque de los motores síncronos, por ejemplo, en las fábricas de cemento y en las instalaciones de trituración.

Los condensadores en paralelo con el motor suministran una parte de la energía reactiva durante la fase de arranque, el factor de potencia del

motor es entonces pequeño. Por tanto, se reduce el consumo de potencia de la red (figura 12).

La puesta en servicio de esta técnica es delicada. Requiere un estudio del conjunto motor-condensadores para evitar las resonancias y las sobretensiones por auto-excitación del motor, y las oscilaciones mecánicas en el sistema de transmisión.

Por otra parte los equipamientos de mando deben ser elegidos especialmente para la conmutación de los condensadores.

Arranque rotórico

Este método de arranque resuelve prácticamente todos los problemas que pueden presentarse en el arranque, sea la:

- reducción de la punta de corriente sobre la red con incremento del par motor,
- adaptación del par motor al par resistente,
- puesta en marcha larga y progresiva (por ejemplo para una carga de gran inercia).

Sólo puede emplearse en los motores asíncronos de rotor bobinado, o en los motores asíncronos sincronizados (cada día menos utilizados en la industria).

Es sobre todo utilizado para los arranques en carga.

Ejemplo de un arranque rotórico de n tiempos.

Este arranque es el que nos ilustran las figuras 13 y 14. El par motor varía entre dos valores en cada escalón. El valor inferior se toma igual al par nominal. En cada escalón, la resistencia rotórica cambia de valor y la característica par-velocidad va evolucionando.

En el último tiempo, la resistencia rotórica se reduce a la resistencia interna del rotor.

- primer tiempo alimentación estática y arranque con la totalidad de la resistencia rotórica por cierre de C_L .

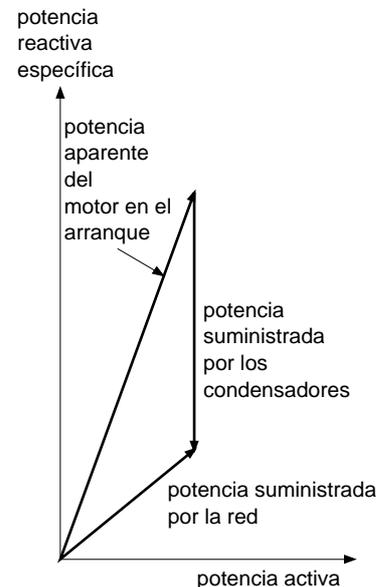


Fig. 12: Diagrama vectorial del arranque por condensadores.

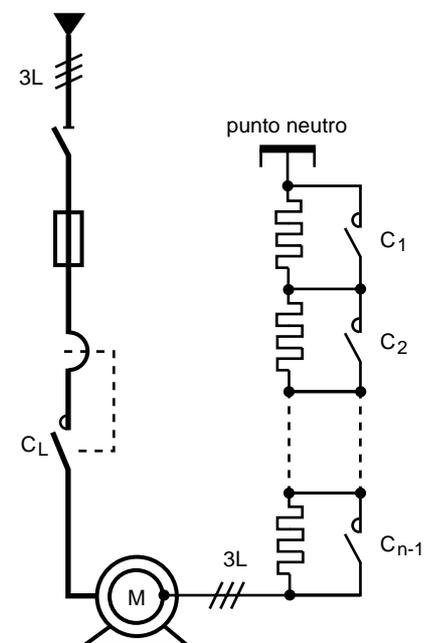


Fig. 13: Esquema de potencia: arranque rotórico.

■ segundo tiempo

cortocircuitado de la primera sección de la resistencia rotórica por el cierre de C_1 .

■ tercer tiempo

cortocircuitado de la segunda sección de la resistencia rotórica por el cierre de C_2 .

■ enésimo tiempo, o último tiempo cortocircuitado de la $n - 1$ sección de la resistencia rotórica por el cierre de C_{n-1} .

El número de tiempos o de escalones, n , es siempre superior en una unidad al número de secciones o contactores.

Este número n viene determinado aproximadamente por la fórmula:

$$n = \frac{\log g_n}{\log \frac{C_n}{C_p}}$$

o por esta otra:

$$\frac{C_n}{C_p} = \eta \sqrt[n]{g_n}$$

en las cuales:

C_p : par de punta

g_n : deslizamiento nominal.

Según los casos, C_p es conocido y n se deduce, o inversamente.

La determinación completa del equipamiento del arranque rotórico necesita el conocimiento del servicio (cadencia horaria y duración del arranque). Debido a que los motores de AT no están normalizados, estos equipos vienen determinados caso por caso, por especialistas.

Notas:

A veces es necesario disponer de un arranque lineal. Para esto se requiere acudir a la electrónica de potencia que permite el control de la energía rotórica; por ejemplo con la ayuda de un puente de Graëtz y de un troceador es posible conseguir una resistencia continuamente variable (figura 15).

Elección del método de arranque

La elección del método de arranque viene condicionada por la correcta adecuación entre el par motor y el par resistente de la carga.

Esto requiere conocer el par resistente (figura 16).

Condiciones de arranque

Teniendo en cuenta las características del arranque deseado es necesario verificar, para los diversos tipos de arranque considerados, que el arranque puede efectivamente producirse en buenas condiciones a nivel del par motor, de la punta de corriente y de la duración del arranque:

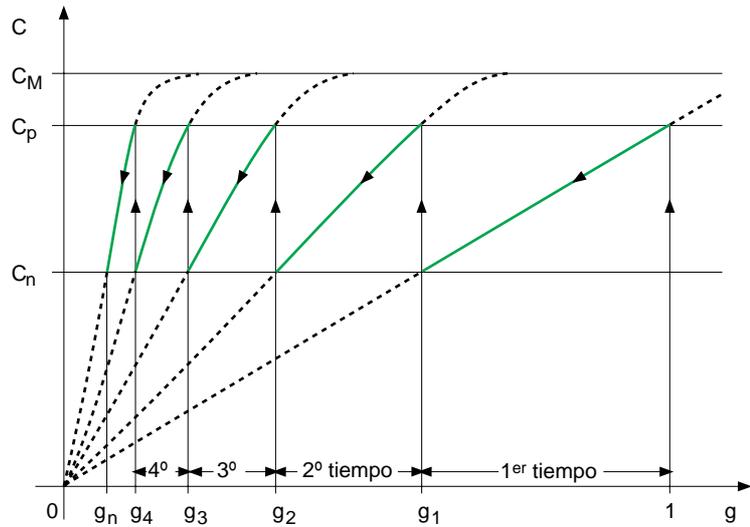


Fig. 14: Diagrama de arranque rotórico simétrico.

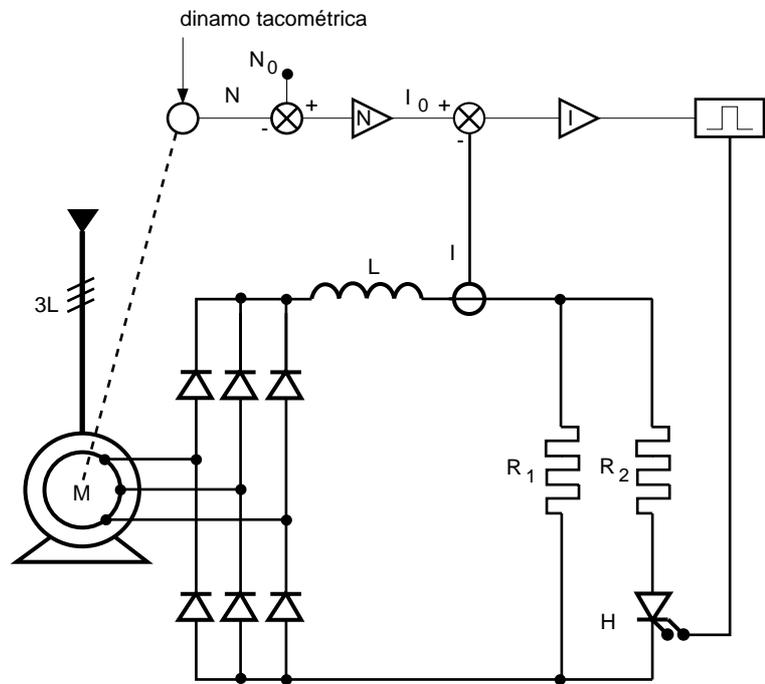


Fig. 15: Regulación de la velocidad por mediación de un triodo rotórico.

- el par motor es siempre superior al par resistente (figura 17),
- la punta de corriente en la red y la caída de tensión correspondiente son admisibles por la red,
- el tiempo de arranque es compatible con los materiales utilizados.

Cálculo aproximado de la duración del arranque

El funcionamiento del conjunto motor-máquina arrastrada, viene regido por la ecuación mecánica:

$$C_m - C_r = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

siendo:

C_m : par motor,

C_r : par resistente,

J : momento de inercia de las masas giratorias (motor y máquina arrastrada),

$$\frac{d\omega}{dt} = \text{aceleración angular.}$$

Durante el tiempo total de arranque Δt , la velocidad angular pasa de 0 a ω_n . Por otra parte puede definirse un par motor acelerador medio C_a , igual a la diferencia media entre C_m y C_r :

Esto implica que:

$$C_a = (C_m - C_r) \text{ medio} = J \cdot \frac{(\omega_n - 0)}{\Delta t}$$

de donde se deduce que:

$$\Delta t = \frac{J \cdot \omega_n}{C_a}$$

Sabiendo que el par motor real varía en función del cuadrado de la tensión de alimentación:

$$\frac{C'_m}{C_m} = \left(\frac{U_{\text{real}}}{U_n} \right)^2$$

el hecho de reducir la tensión reducirá C_a y en consecuencia aumentará el tiempo de arranque.

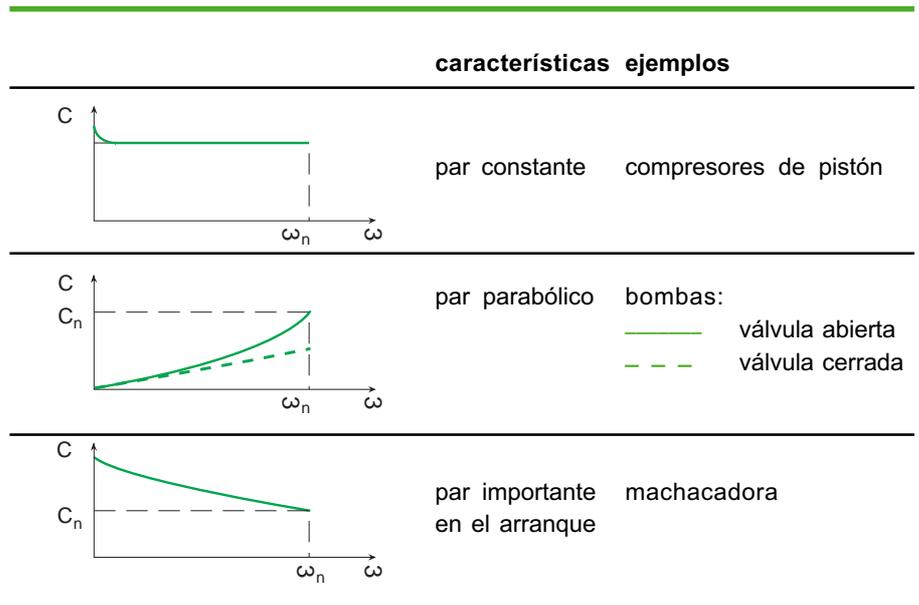


Fig. 16: Distintas curvas del par resistente de las máquinas arrastradas (cargas).

Tabla de elección del método de arranque

La tabla de la figura 18 resume las ventajas y los inconvenientes de los principales métodos de arranque para las distintas aplicaciones.

Para un par determinado, la intensidad absorbida de la red responde al siguiente orden creciente:

- arranque rotórico,
- arranque por autotransformador,
- arranque por impedancias estáticas,
- arranque directo.

La elección del método de arranque requiere una buena comunicación entre la empresa suministradora de la energía eléctrica, el constructor del motor y el de la máquina arrastrada.

Las características indispensables en esta elección son:

- la potencia de la red de alimentación y la punta de corriente máxima autorizada,

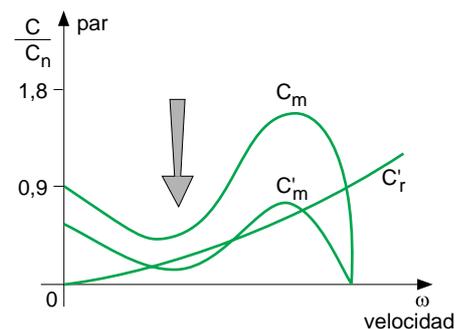


Fig. 17: Caso de no arranque.

- el par y la intensidad del motor a plena tensión, en función de la velocidad del motor,
- el par resistente de la máquina arrastrada figura 16,
- el momento de inercia de las masas giratorias.

Si la relación entre la potencia de la red de alimentación y la potencia del motor es inferior a 5, se deberá de prestar un cuidado particular a la elección del método de arranque, así como a la coordinación del conjunto de protecciones (anexos 1 y 2).

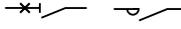
Necesidades de la aplicación	Características de la aplicación	Método de arranque	Mando por	Ventajas inconvenientes
proceso permanente o casi permanente arranque $\leq 1/\text{día}$	máquinas que necesitan un fuerte par de arranque	directo	 1 ó 1	simplicidad, inversión reducida. <i>en el arranque:</i> ■ <i>par importante,</i> ■ <i>punta de corriente importante,</i> ■ <i>fuertes exigencias mecánicas.</i>
arranques frecuentes $> 1/\text{día}$	motores de pequeña punta de arranque o de pequeña potencia	directo	1	
bombas, ventiladores, compresores con arranques frecuentes	máquinas que arrancan con un reducido par	estatórico por reactancia	2	reducción del par y de la punta de corriente en el arranque (posible ajuste)
optimización de las características del arranque	cuando la intensidad de arranque debe ser reducida, conservando el par necesario para el arranque	estatórico por auto-transformador	3	optimización del par (<i>reducido</i>) y de la punta de corriente en el arranque (ajuste posible)
optimización de las características de arranque con fuerte par	arranque de mayor dificultad	rotórico	generalmente 3	débil punta de corriente de arranque y gran par de arranque

Fig. 18: Tabla de elección del método de arranque en los casos más corrientes.

3 Aparamenta de control y mando

La aparamenta tiene tres funciones:

- asegurar la puesta en tensión y la parada (mando),
- desconectar el motor en caso de defecto (protección),
- asegurar un cierto control de la marcha del motor (control).

Por control se sobreentiende que la aparamenta es capaz (o no) de:

- controlar el arranque (automatismo de la secuencia del proceso de arranque),
- actuar sobre la velocidad del motor,
- suministrar información sobre el estado eléctrico del motor y también contribuir a su protección.

Para la función de control se recurre sobre todo a la electrónica de potencia y de señal (tecnología digital); ésta se halla en pleno desarrollo. La protección de los motores AT se verá en el capítulo siguiente.

Soluciones electromecánicas

La elección entre los diferentes aparatos de maniobra (interruptor, interruptor automático, contactor) depende de:

- la cadencia de maniobras,
- la endurance eléctrica,
- la potencia del motor.

Las principales características de los aparatos de corte se resumen en la **figura 19**.

Interruptores - fusibles

Los interruptores, por su propio diseño, tienen un poder de corte, una endurance mecánica y eléctrica reducidas, lo que limita su empleo a las pequeñas potencias ($I_n = 50$ A, aproximadamente, 5 500 V) y a cadencias de dos a tres maniobras diarias.

Además, ese limitado poder de corte hace que la elección de las protecciones sea delicada.

Interruptores automáticos

Los interruptores automáticos se emplean para motores de grandes potencias, más de 300 A, con pequeña cadencia de maniobra y para tensiones de servicio superiores a 6,6 kV.

Se sobreentiende que su empleo puede extenderse a potencias menores, maniobrables por interruptor o contactor.

Contactores - fusibles

- cadencia de maniobras

La mecánica de mando simple, la robustez y la simplicidad de sus contactos permiten al contactor una cadencia de funcionamiento elevada.

Esta cadencia no puede soportarla un interruptor automático, aunque sea especial, y menos aún un interruptor.

Algunas instalaciones utilizan contactores con enclavamiento mecánico para eliminar el consumo permanente del electroimán de cierre, lo que puede reducir la endurance mecánica por causa de la mayor complejidad de la cadena cinemática.

- potencia de cortocircuito de la red

Este factor interviene poco en un montaje con contactores, gracias a la presencia de los cortocircuitos-fusibles, situados inmediatamente después del seccionador de

aislamiento, o cerca de las pinzas de conexión, en el lado del juego de barras.

Estos fusibles de alto poder de ruptura limitan la corriente de cortocircuito.

Esta particularidad permite, si se aumenta la potencia de la red, conservar las celdas de salida motor; los soportes del juego de barras pueden eventualmente reforzarse.

Fusibles

El calibre de los fusibles viene determinado en función de:

- la intensidad nominal I_n ,
- la relación I_d/I_n (I_d = corriente de arranque),
- la duración del arranque determinada con ayuda del ábaco de la **figura 20**.

Para mayor precisión en la elección del fusible, el(la) lector(a) puede acudir al Cuaderno Técnico nº 107.

Conviene por último recordar que los fusibles protegen al motor contra las sobreintensidades superiores a unas cinco veces la corriente nominal del motor y que deben estar asociados a protecciones complementarias (relés térmicos, según se ve en el capítulo de protecciones).

Transformadores de corriente

La utilización, cada vez más frecuente, de protecciones digitales hace posible el empleo de captadores de corriente no convencionales (por ejemplo los toros de Rogowski).

aparato	cadencia media	endurance nº maniobras	potencia admisible del motor
interruptor-fusibles	baja: 2 - 3 veces / día	2 000	pequeña ≤ 50 A
interruptor automático	baja 10 veces / día	10 000	elevada $\geq 7,2$ kVA > 300 A
contactor-fusible	elevada > 10 / hora	$> 100 000$	media ≤ 300 A

Fig. 19: Dominio de empleo de la aparamenta de corte.

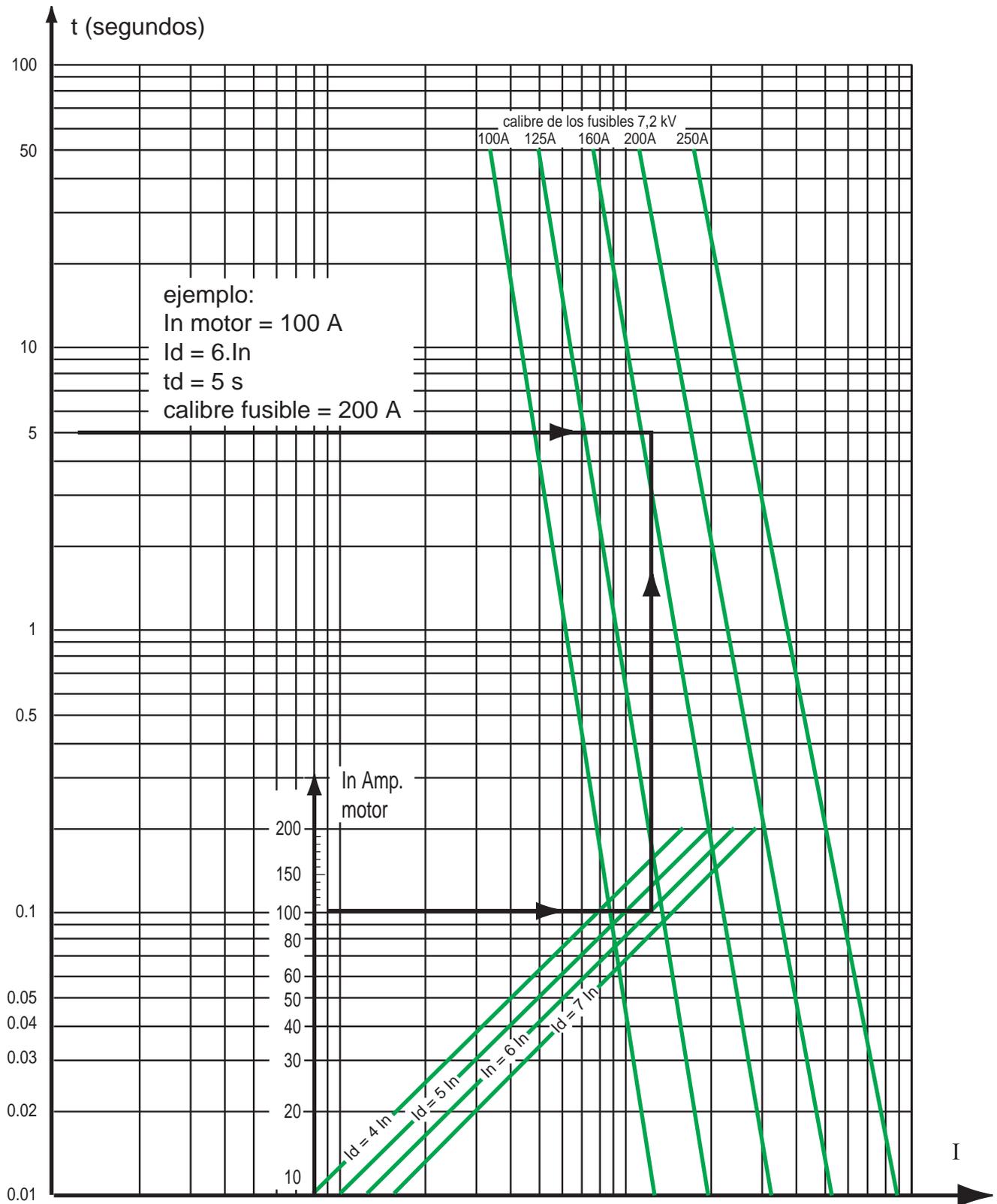


Fig. 20: Ábaco para la determinación de los fusibles.

La ventaja de estos captadores es que son lineales y por tanto suministran una señal precisa en toda la gama de corriente utilizada.

No presentan problemas a nivel de saturación, ni en el plano térmico, como puede ser el caso de los transformadores de corriente clásicos (ver Cuaderno Técnico nº 112).

Particularidades debidas al empleo de fusibles o de interruptores automáticos

- funcionamiento en monofásico debido a la fusión de un fusible y no funcionamiento del percutor.

El nivel de fiabilidad de los percutores hoy en día es tal que este riesgo es pequeño.

El nivel de seguridad puede aún aumentarse con el empleo de una protección suplementaria (relés de falta de tensión o de desequilibrio).

- selectividad con la aparataje aguas arriba.

Puede ser delicada de realizar cuando simultáneamente:

- los fusibles utilizados son de elevado calibre (200 A ó 250 A),
- la salida protegida por estos fusibles representa una fracción importante de la potencia suministrada por el interruptor general (figuras 21 y 22).

Sin embargo, el elevado poder de corte de los contactores Rollarc, asociado a estos fusibles, permite la utilización de relés de intensidad máxima con poca temporización y el reencuentro de la selectividad. La selectividad es más fácil de conseguir si la salida motor está protegida por interruptores automáticos, pero, bajo fuertes corrientes de cortocircuito, al no estar limitada la corriente, se tiene un incremento de los esfuerzos térmicos.

- sobretensiones

Ciertos tipos de aparatos de ruptura y particularmente los de corte al vacío, provocan sobretensiones en la conexión o desconexión del motor (a causa de su aptitud para cortar las corrientes de alta frecuencia, que resultan por ejemplo, del fenómeno de supresión de la corriente - ver Cuaderno Técnico nº 143).

A fin de evitar que estas sobretensiones vayan degradando, poco a poco, el nivel de aislamiento del motor, los fabricantes colocan en la aparataje, si es necesario, limitadores de sobretensiones, del tipo ZnO.

En conclusión, parece que las soluciones electromagnéticas son hoy en día fiables, robustas y económicas y en consecuencia son perfectamente válidas en la gran mayoría de los casos.

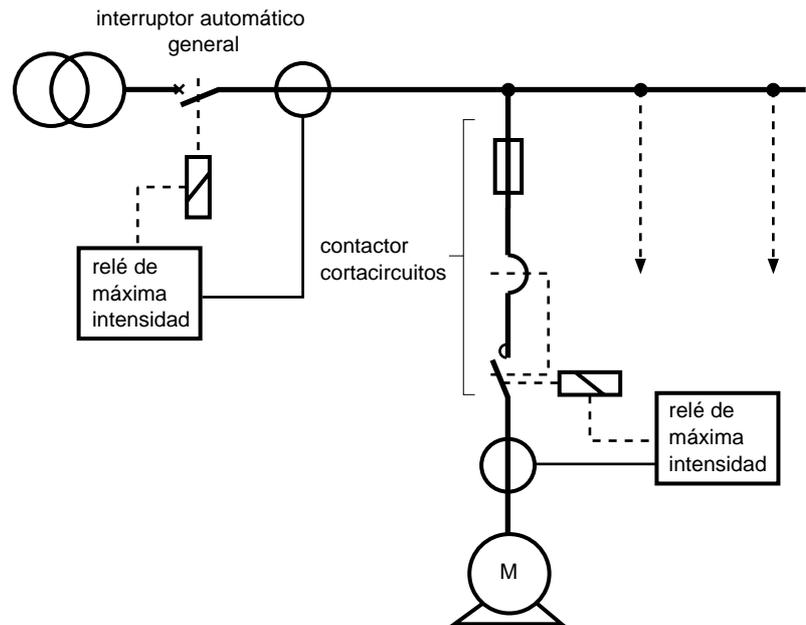


Fig. 21: Esquema de protección de una salida motor de fuerte intensidad.

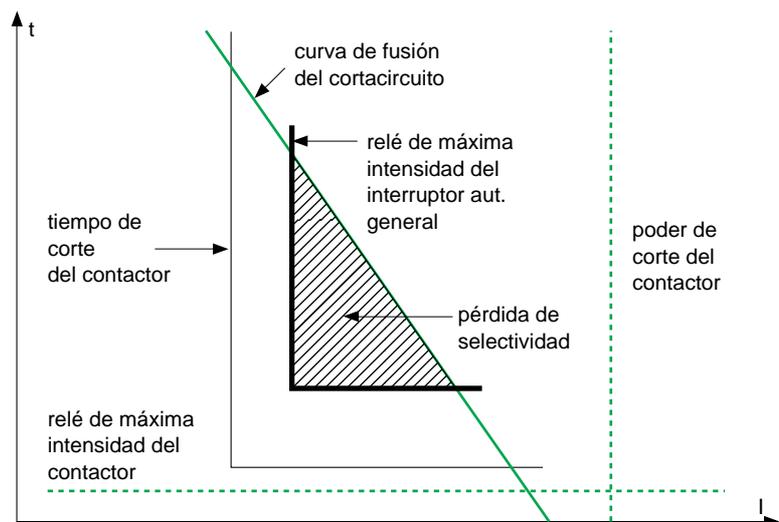


Fig. 22: Diagrama de selectividad en el caso de una salida motor de fuerte intensidad.

motor	cargas	variación de velocidad	potencia	rendimiento global	tipo de variación
asíncrono o síncrono	bombas, ventiladores, compresores, extrusores	0% a más de 100%	desde 10 kW a cientos de kW	0,85 a 0,90	rectificador/ondulador autónomo
asíncronos de anillos	ídem	60% a 100% *	algunos 100 kW a algunos MW	0,90 a 0,95	cascada hiposíncrona
síncrono	ídem centrifugadoras bogies TGV-A (gran velocidad)	0% a varias veces 100%	100 kW a algunos 10 MW	0,90 a 0,95	rectificador/ondulador autopilotado
asíncronos o síncronos	machacadoras, laminadores, hornos de cemento (pequeña velocidad)	0% a $\pm 33\%$	100 kW a algunos 10 MW	0,85 a 0,90	ciclo convertidor

* : 100% corresponde a la velocidad relativa a 50 Hz.

Fig. 23: Dominio de aplicación de los variadores electrónicos para motores de corriente alterna.

Soluciones electrónicas

Al utilizarlas aportan posibilidades y ventajas suplementarias tales como:

- velocidad variable,
- posibilidades de regulación de la velocidad,
- elevadas cadencias de maniobra,
- ahorro de energía.

Rara vez se usa la solución electrónica sólo para realizar el arranque.

Antes de abordar los casos típicos de dispositivos electrónicos, es necesario recordar que su utilización requiere un determinado número de precauciones constructivas a nivel del motor:

- un cierto margen de seguridad en su calentamiento a causa de los armónicos: un margen del 15% en la corriente generalmente es suficiente,
- se recomienda ventilación forzada (los motores pueden funcionar a baja velocidad),
- refuerzo del aislamiento entre espiras, a causa de los importantes gradientes de tensión generados por la conmutación de los tiristores (que pueden alcanzar el orden de magnitud de los ensayos de choque).

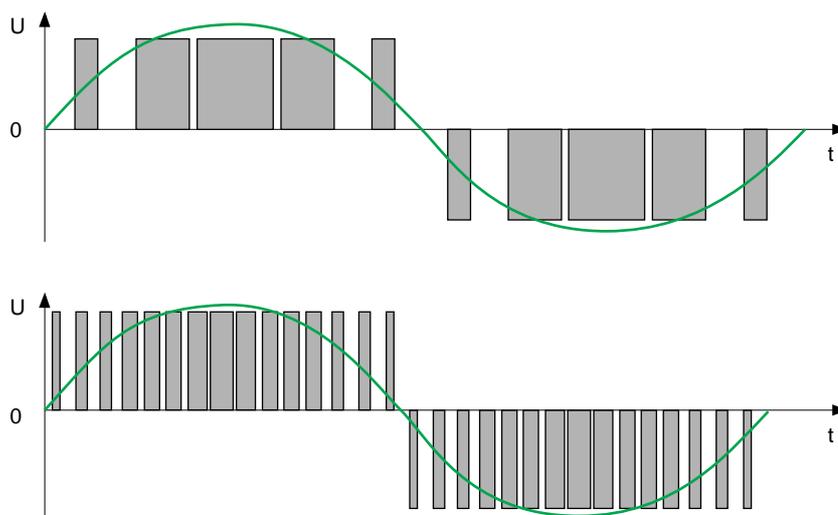


Fig. 24: Generación de tensiones y frecuencias variables con los variadores con modulación de ancho de impulso (PWM).

Los dispositivos que presentamos son los más utilizados en media tensión. Se exponen sólo los principios generales.

La tabla de la **figura 23** permite tener una indicación sobre la correspondencia entre el tipo de variador, el tipo de motor y la carga arrastrada.

Rectificadores - onduladores autónomos

Son capaces de suministrar una tensión y una frecuencia variables, lo que permite un perfecto dominio de la velocidad y del par del motor.

Recordemos que en los motores asíncronos:

- el par es proporcional a U^2 , si f y N son constantes,

- el par es inversamente proporcional a f para una tensión y velocidad dadas.

Existen tres tipos de rectificadores-onduladores autónomos.

- rectificador-ondulador de tensión
- el rectificador a tiristores regula la tensión,
- el ondulator a tiristores suministra una tensión alterna de frecuencia variable.

Este esquema se utiliza también en los Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI), utilizados en BT para alimentar los ordenadores; la única diferencia es que, en éstos, la frecuencia y la tensión son fijas.

- rectificador-ondulador PWM o sea, con Modulación de Ancho de Impulso.
- el rectificador a diodos alimenta el ondulator,

- el ondulator genera impulsos de tensión que permiten reconstruir una senoide de periodo y amplitud variables (figura 24).

- rectificador-ondulador de corriente (conmutador)

- el rectificador a tiristores asociado a una autoinducción de alisado se comporta como un generador de corriente continua,

- el ondulator conmuta la corriente sucesivamente en los devanados del motor con la ayuda de condensadores.

La frecuencia y por tanto la velocidad del motor dependen de la velocidad de conmutación.

Algunos elementos de comparación entre estos tres tipos de rectificadores-onduladores

- el ondulator de tensión
- es conveniente para los motores de grandes reactancias,
- necesita a menudo un filtro entre ondulator y motor,
- permite el frenado por recuperación, si el rectificador es reversible.

- el ondulator de modulación de ancho de impulso (PWM)
- permite una amplia gama de velocidad,
- la velocidad máxima queda limitada por la frecuencia de conmutación máxima que soportan los tiristores del ondulator. La utilización de transistores de potencia (IGBT) permite trabajar a frecuencias mucho más elevadas, pero para potencias menores,
- es posible el funcionamiento reversible (dos sentidos de rotación).

- el conmutador de corriente
- es adecuado para motores de pequeñas reactancias,
- permite el funcionamiento en los cuatro cuadrantes.

Cascada hiposíncrona

El motor asíncrono de rotor bobinado se alimenta, por lo general, por la red de distribución.

Para actuar sobre su velocidad es suficiente actuar sobre la corriente rotórica; esto se lleva a cabo mediante el conjunto rectificador-

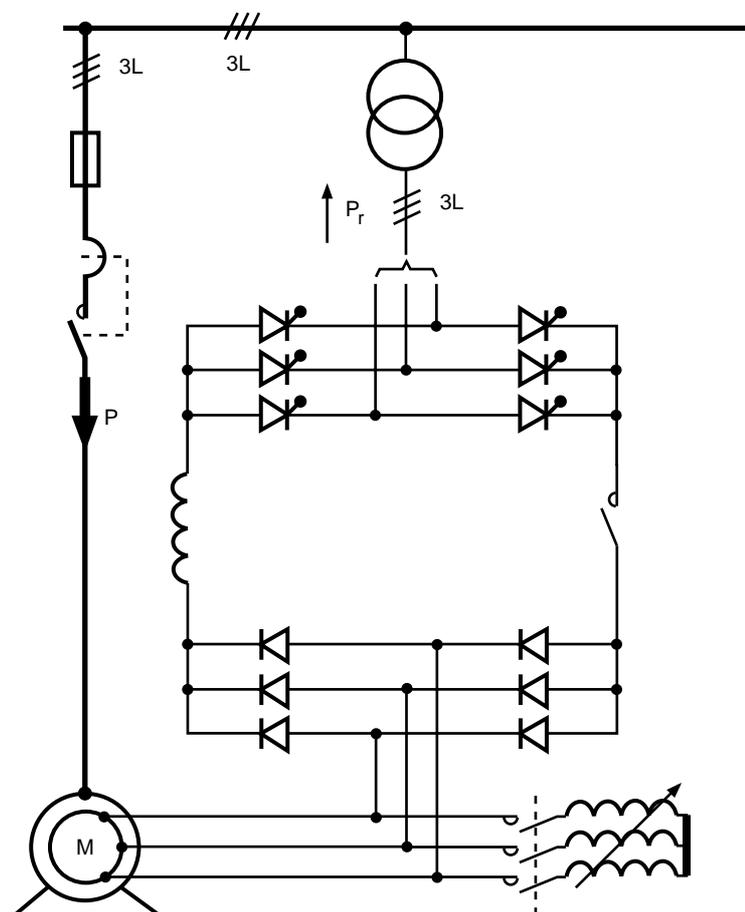


Fig. 25: Esquema de potencia de la cascada hiposíncrona.

ondulador. El rectificador toma la energía del circuito rotórico lo que aumenta el deslizamiento. Esta absorción de energía depende de la regulación de conducción de los tiristores del ondulator que reinyectan la energía a la red (**figura 25**). La cascada hiposíncrona permite una variación continua de la velocidad con un deslizamiento máximo del orden del 40%.

El conjunto del convertidor tiene una potencia pequeña con relación a la potencia del motor y la recuperación de energía permite obtener un excelente rendimiento global.

Hay que subrayar que el convertidor sólo entra en funcionamiento después de haber arrancado el motor por resistencias rotóricas.

Este montaje puede funcionar por encima de la velocidad de sincronismo (hipersíncrono) en el caso de cargas que pasen a actuar como motores.

Rectificador-ondulador autopilotado

Al igual que el rectificador-ondulador autónomo por conmutación de corriente, las fases del estator del motor (aquí síncrono) están alimentadas secuencialmente, una después de la otra.

La conmutación de una fase del estator a la siguiente es autopilotada por la velocidad del motor gracias a un captor, «disco con ranuras».

Se tiene así una correspondencia entre el flujo de excitación y el flujo del inducido, como en las máquinas de corriente continua, y el peligro de desenganche es nulo.

En el arranque y a pequeña velocidad, la conmutación presenta problemas y es necesario modificar el sistema de mando de los convertidores.

Esta solución se adapta muy bien a los motores síncronos.

Ciclo convertidor

Cada fase del motor se «alimenta» desde un doble puente trifásico.

El primer puente sirve para la toma de la corriente durante la alternancia positiva, y esto sucesivamente sobre una u otra de las fases de la red de alimentación según la frecuencia deseada.

El segundo puente sirve para el retorno de la corriente durante la alternancia negativa, y esto hacia una u otra de las fases.

El ciclo convertidor genera así una pseudo-red trifásica que necesita un filtrado y cuya frecuencia puede evolucionar entre 0% y el tercio de la frecuencia de la red.

4 Protección de los motores de AT

Un «conjunto de protección del motor» reagrupa los dispositivos que permiten evitar averías importantes inherentes a las condiciones anormales de funcionamiento a nivel de la alimentación, motor o proceso.

La elección de las protecciones a instalar se hace en función:

- de las condiciones de explotación,
- de la importancia del servicio que asegura el motor,
- del grado de seguridad deseado,
- del coste relativo de la protección respecto al motor,
- de la probabilidad de que se manifiesten los defectos considerados.

Pero también:

- del tipo de carga arrastrada,
- de las perturbaciones que pueden aparecer en la red,
- del tipo de motor protegido.

Así, los defectos que se enumeran a continuación pueden ser objeto de una protección.

Principales tipos de defectos

Motores asíncronos

- sobrecargas,
- cortocircuitos,
- ruptura, inversión y desequilibrios de fases,
- defecto de aislamiento entre espiras,
- masa estator,
- tensión mínima y máxima,
- arranque incompleto.

Motores síncronos

- ruptura de sincronismo,
- pérdida de la excitación,
- masa rotor,
- marcha prolongada en asíncrono en el arranque,

- sobrecarga y cortocircuitos en el arrollamiento de excitación,
- retorno de potencia (marcha como alternador).

Otros defectos ligados al proceso o a la carga

- arranques demasiado frecuentes,
- bloqueo del motor,
- mínimo de potencia o de corriente.

En los párrafos siguientes se estudian los procesos de detección-protección que se refieren a los principales tipos de defecto.

Principios de protección

Sobrecargas

La sobrecarga puede detectarse por relés de máxima intensidad a tiempo inverso, por relés a imagen térmica o también por sondas térmicas.

Los relés tratan la información «corriente absorbida por el motor», que generalmente se capta con transformadores de corriente.

Las sondas térmicas se colocan en las partes activas del motor.

- relés de máxima intensidad a tiempo inverso.

Su empleo necesita:

□ o una curva de funcionamiento $I(t)$ que permita el arranque, o un dispositivo de bloqueo del relé durante el arranque,

□ un umbral de funcionamiento I_0 , próximo a la corriente nominal I_n del motor

$$I_0 \approx 1,10 I_n$$

Estos relés no memorizan las sobrecargas.

- relés a imagen térmica

Estos relés son, ciertamente, los mejor adaptados, pues permiten utilizar al máximo las posibilidades de sobrecarga del motor sin implicar deterioros.

La curva de funcionamiento, $I(t)$, del relé debe permitir el paso de la

corriente de arranque sin desconexión y recibir la conformidad del constructor del motor.

- sondas térmicas

Son resistencias cuyo valor óhmico varía mucho con la temperatura.

En principio estos dispositivos no se utilizan solos, sino que se añaden los relés que utilizan la corriente absorbida como medio de medida.

La sobrecarga debida al calentamiento de un cojinete es, en principio, insuficiente para que la detecten los relés de sobrecarga.

La protección de los cojinetes debe de asegurarse con termostatos o con sondas térmicas.

Cortocircuitos

En los equipamientos con interruptor automático, los cortocircuitos los detectan los relés de máxima intensidad, de funcionamiento instantáneo, ajustados por encima de la corriente de arranque.

En los equipos con contactor y fusibles, son los fusibles los que eliminan los cortocircuitos.

Con todo, una solución interesante consiste en asociar a los fusibles, relés de máxima intensidad ligeramente temporizados. Esta disposición permite la utilización del contactor hasta su poder de corte.

Rupturas, inversión y desequilibrio de fases

Estos defectos son detectados gracias a un filtro que pone en evidencia las componentes inversas.

La vigilancia de la falta de una fase o de un desequilibrio es importante, pues estos defectos provocan:

- en el estator un aumento de la corriente,
- en el rotor un calentamiento suplementario por efecto Joule debido al hecho de que todo desequilibrio se traduce por la aparición de corrientes inversas que

circulan por el rotor a una frecuencia doble de la alimentación.

La inversión de las fases se detecta o por las corrientes o por las tensiones:

- por las corrientes: la inversión se pone de manifiesto después del cierre del contactor, la máquina arrastrada gira al revés y puede sufrir desperfectos,
- por las tensiones: esta detección permite impedir eventualmente el cierre del contactor, si la red no presenta su orden normal de sucesión de fases.

Defecto de aislamiento en el bobinado

Los arrollamientos estáticos pueden presentar defectos de aislamiento entre espiras de una misma fase o entre devanados de fases diferentes.

Según la situación eléctrica en la que se produce el defecto, puede que la protección de sobrecarga no actúe con la suficiente rapidez y se originen desperfectos importantes.

La detección de estos defectos se hace, generalmente, por comparación de corrientes.

■ protección diferencial longitudinal

Protege contra los defectos entre devanados de fases diferentes.

Para su realización, el motor debe de tener accesibles los extremos de cada uno de sus arrollamientos en el lado del neutro.

Los defectos se detectan comparando las corrientes de entrada y de salida de cada una de sus fases (figura 26).

Cuando no hay defecto, estas corrientes son idénticas y el relé de protección no se excita.

Éste actúa y da orden de disparo cuando la diferencia entre estas corrientes alcanza un valor fijado por la regulación del relé.

■ protección diferencial transversal

Protege contra los defectos entre espiras de una misma fase. Sólo puede aplicarse a las máquinas con fases divididas, es decir, con dos devanados en paralelo por fase.

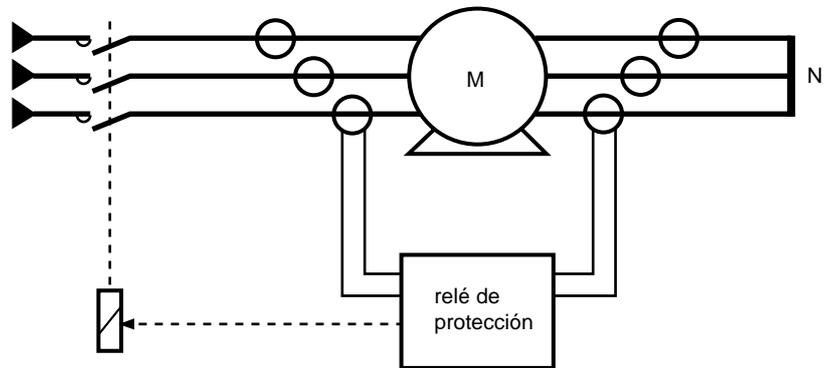


Fig. 26: Esquema de una protección diferencial longitudinal.

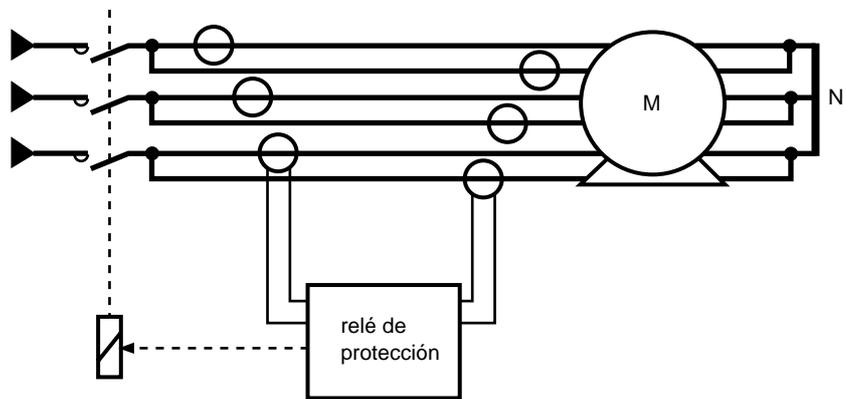


Fig. 27: Esquema de una protección diferencial transversal.

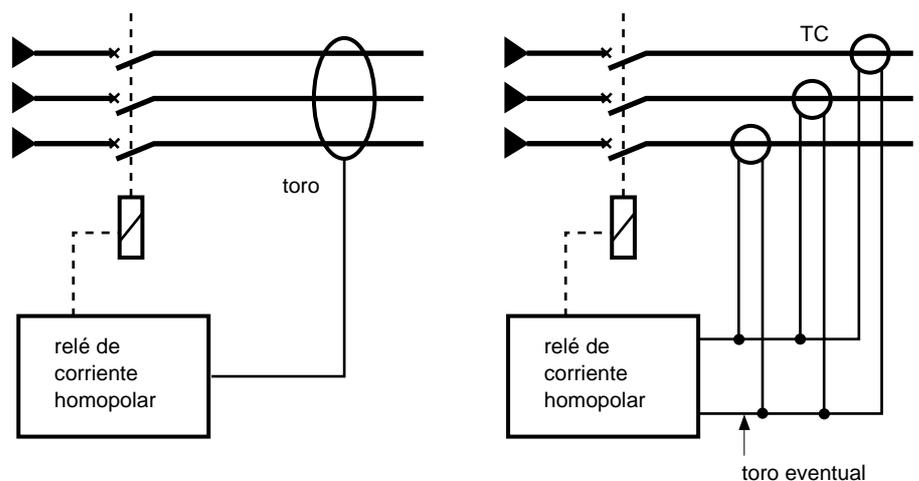


Fig. 28: Esquema de una protección homopolar masa en el estator, con un captor toroidal o con transformadores de corriente, en una red con neutro a tierra o impedante.

El principio de funcionamiento es idéntico al anterior, a base de comparar las corrientes de cada uno de los devanados de fase (figura 27).

Masa en el estator

Esta protección es indispensable como protección contra las personas. Su elección deberá hacerse en función del régimen de neutro de la red que alimenta el motor.

■ protección de un motor alimentado por una red con neutro a tierra o neutro impedante.

La detección del defecto se realiza por la medida de la corriente homopolar que se establece entre la fase con defecto y la masa de la red. Esta medida se lleva a cabo por relés de máxima intensidad de umbral bajo.

La corriente homopolar la suministran tres transformadores de intensidad en paralelo, uno por fase; o mejor, por un toroide que envuelve los tres conductores de fase (figura 28).

El toroide suprime la aparición de una falsa componente homopolar debida a la saturación desigual de los transformadores de corriente en el arranque del motor y permite un umbral de funcionamiento relativamente bajo.

Estos relés deben funcionar para un valor de la corriente de defecto tal que el potencial de las masas con relación a tierra no sea en ningún caso superior a 24 V en un medio conductor, con las masas interconectadas, o a 50 V en los demás casos de instalación.

La determinación de este punto de regulación necesita, por tanto, el conocimiento del valor de las tomas de tierra y del esquema de interconexión de las masas.

Si las masas no están interconectadas, el valor del umbral de funcionamiento viene dado por:

$$I_F \leq \frac{24 \text{ ó } 50 \text{ V}}{R_{TM}}$$

siendo R_{TM} el valor de la resistencia de tierra de la masa considerada.

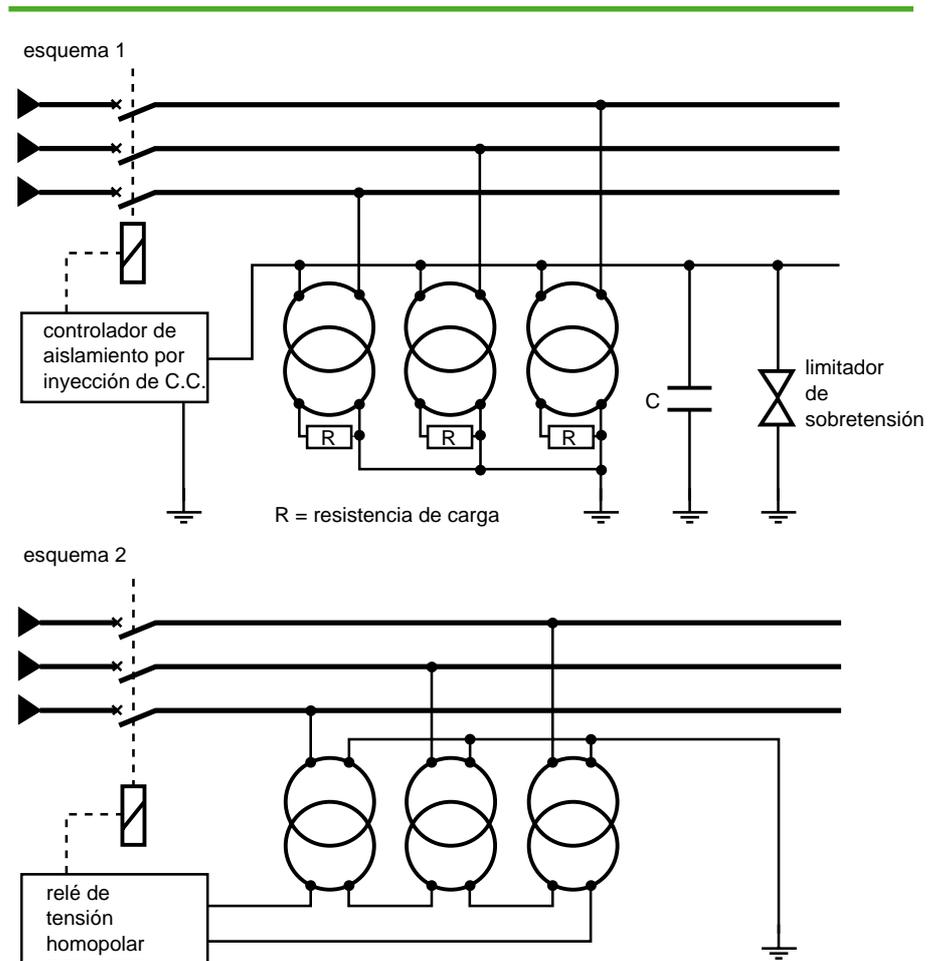


Fig. 29: Esquemas de control de defectos de aislamiento con controlador permanente de aislamiento con relés de tensión homopolar-neutro aislado.

Nótese que cuanto más bajo sea el umbral, más precisa será la detección y menor será el riesgo de deterioro de los circuitos magnéticos.

■ neutro aislado

La detección del defecto se realiza por la medida permanente del aislamiento global de la red con relación a tierra mediante dispositivos a inyección de corriente continua, como los controladores permanentes de aislamiento (esquema 1 de la figura 29) o por relés de tensión máxima homopolar, suministrada por tres transformadores de tensión con sus secundarios en triángulo abierto (esquema 2 de la figura 29).

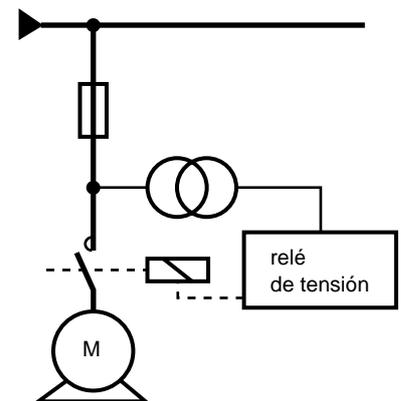


Fig. 30: Esquema de la protección mínima y máxima de tensión. Lo más frecuente es que dos TU suministren las tensiones compuestas del relé.

Tensión máxima y mínima (figura 30)

■ tensión mínima

Esta protección es relativamente frecuente: evita el que un motor tenga que trabajar con sobrecarga y esperar a que la desconexión se produzca por la protección de sobrecarga. Por otra parte, si la bobina del contactor se alimenta con una fuente auxiliar de BT, que no proceda de la red, la protección de tensión mínima o la falta de tensión a la conexión se hace indispensable para evitar una puesta en marcha no controlada al retorno de la tensión.

La información «tensión» viene dada por un transformador de tensión y tratada por un dispositivo de umbral y temporizable.

■ tensión máxima

Esta protección debe preverse cuando se producen fuertes variaciones de tensión en la red de alimentación.

Evita el tener que esperar la actuación de los relés de sobrecarga, pues un máximo de tensión se traduce por una sobreintensidad del motor y un aumento del par motor que puede ser nefasto para la máquina arrastrada.

La detección la realizan los relés de medida de tensión máxima temporizados.

Arranque incompleto o excesivamente prolongado

Esta protección se justifica en los arranques en varios tiempos.

Se realiza con un relé temporizado que se pone en servicio al empezar el arranque y se desconecta al finalizar. La magnitud controlada puede ser la velocidad, o la corriente.

Así se evita la utilización prolongada del sistema de arranque, calculado para funcionar durante un tiempo dado.

Ruptura del sincronismo

Se trata de una protección importante en los motores síncronos.

En efecto, la jaula de amortiguamiento de un motor síncrono es relativamente débil con relación a la corriente: si el motor

pierde el sincronismo, ésta jaula soporta fuertes corrientes inducidas que pueden destruirla si no se desconecta el motor.

Esta pérdida del sincronismo se puede producir como consecuencia de una sobrecarga mecánica, de un mínimo de tensión, o de una pérdida o reducción de la excitación.

La detección de este defecto se realiza con relés de mínima impedancia, o de factor de potencia, alimentados por transformadores de tensión y por transformadores de corriente (figura 31).

Pérdida de la excitación

Esta pérdida, debida por ejemplo a una ruptura del devanado rotórico, provoca la parada del motor.

Puede detectarse:

- o por la protección «ruptura del sincronismo» antes descrita,
- o por un relé a mínima tensión o a mínima corriente de la excitación.

Masa en el rotor de un motor síncrono

Esta protección debe determinarse en función del esquema de alimentación y del modo de producción de la corriente continua.

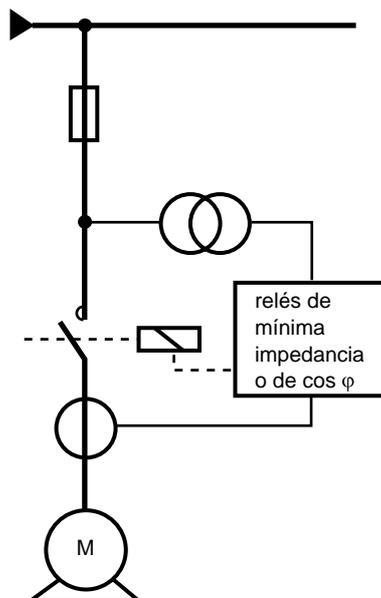
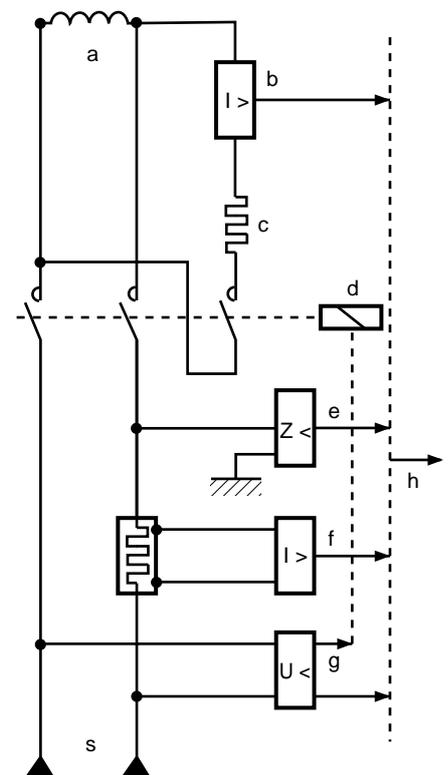


Fig. 31: Protección contra la ruptura del sincronismo.

Si el conjunto del circuito de excitación de corriente continua está aislado de la masa, un primer defecto de aislamiento no afecta al funcionamiento del motor.

Pero si se produce un segundo defecto se puede provocar una sobrecarga o un cortocircuito con todas sus consecuencias. Los relés de detección de este defecto son, en general, aparatos a inyección de corriente alterna de baja frecuencia, 10 ó 20 Hz (figura 32).



- a. devanado de excitación
- b. protección térmica: marcha prolongada en asincronismo
- c. resistencia de arranque
- d. contactor de excitación
- e. protección masa rotor
- f. protección a máxima intensidad de excitación
- g. protección a mínima tensión de excitación
- h. hacia la desconexión del contactor
- s. fuente de corriente continua

Fig. 32: Protección del rotor en el arranque y en funcionamiento de motores síncronos.

También se emplea la frecuencia de 50 Hz, pero impone no tener componentes de 50 Hz en la corriente de excitación.

Marcha prolongada en asíncrono en el arranque

En los motores síncronos, una duración excesiva del arranque provoca un calentamiento exagerado de la jaula de amortiguamiento.

Se utiliza la protección «arranque incompleto» descrita anteriormente, o un dispositivo térmico adaptado a la constante de tiempo térmica del rotor, en serie con la inductancia durante el arranque (figura 32, elemento b).

Sobrecarga y cortocircuito en el devanado de excitación

Estas protecciones evitan el deterioro, por calentamiento, del devanado de excitación y de su alimentación. La detección se realiza con un relé a máxima corriente de excitación.

Además se emplea, generalmente, un relé de tensión mínima de excitación que funciona ante una bajada de tensión provocada, por ejemplo, por un cortocircuito.

En el arranque, este relé se utiliza para detectar la presencia de tensión de excitación y permitir el cierre del contactor de excitación al final del arranque en asíncrono (figura 32, elemento g).

Retorno de potencia

Esta protección se aplica especialmente a los motores síncronos.

Al desconectar el interruptor automático de alimentación se evita la devolución de energía eléctrica a las cargas conectadas sobre el mismo juego de barras.

Impide igualmente que el motor alimente un defecto sobre este juego de barras.

La protección debe detectar una inversión del sentido de la corriente o de la potencia.

Se efectúa, pues, con relés direccionales de potencia (figura 33).

Arranques frecuentes

Un excesivo número de arranques en un tiempo determinado puede conducir a un deterioro del motor si éste no ha sido dimensionado para tal servicio.

Esta protección se realiza por un relé que controla las funciones de número de arranques y de temporización y limita automáticamente:

- o el número de arranques en un intervalo de tiempo dado,
- o el espaciado en el tiempo de estos arranques.

Bloqueo del rotor

El bloqueo de un motor por una causa mecánica provoca una sobreintensidad sensiblemente igual a la corriente de arranque. El calentamiento que de ello resulta es mucho más importante, pues las pérdidas en el rotor se mantienen en su valor máximo durante todo el bloqueo y la ventilación cesa si ésta está ligada al giro del rotor. En consecuencia, cuando existe el riesgo de que pueda producirse este defecto mecánico es necesario utilizar la protección de «bloqueo del rotor», pues los relés de sobrecarga a veces responden al cabo de un tiempo demasiado largo.

La detección de este defecto se realiza con un relé amperimétrico, regulado a un valor inferior a la corriente de arranque, que es validado después de una «temporización arranque» a la puesta en tensión del motor; esta temporización se ajusta a un valor superior o igual a la duración normal del arranque.

Mínimo de intensidad o de potencia

Una bomba, si se desceba, puede deteriorarse. Cuando se produce esta situación, se tiene una disminución de la potencia activa absorbida por el motor. Un relé de corriente mínima protege contra este defecto.

Evolución tecnológica

En la descripción de las distintas protecciones que acabamos de hacer se ha utilizado a menudo el término «relé». Se trata de un hábito de lenguaje (relé = tipo de protección) que corresponde a la época en la que proteger un motor requería el empleo de «relés» separados dedicados a una sola función de protección.

Durante la década de los 70, los constructores, con el deseo de flexibilizar la adaptación a las necesidades, han comercializado los RACKS, capaces de contener múltiples protecciones distintas.

Después, en los años 80, la tecnología digital ha incrementado las posibilidades de adaptación; así un solo y único dispositivo programable permite realizar las diversas funciones de protección y control-mando que requiere cada caso particular.

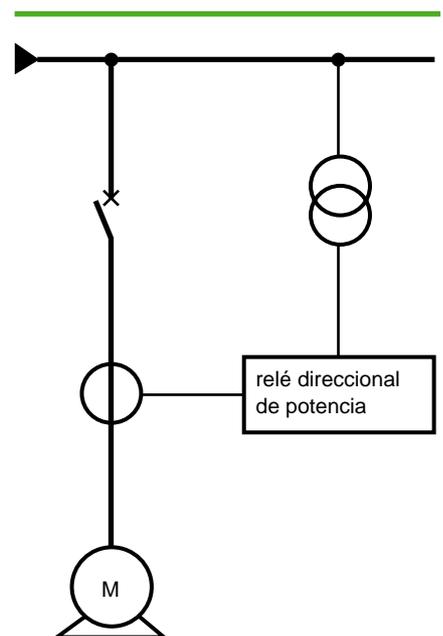


Fig. 33: Protección contra el retorno de potencia.

Anexo 1: Determinación del tipo de arranque de un motor

La finalidad del ejemplo siguiente no es resolver completamente un problema, sino ilustrar, de forma concreta, una sistemática de cálculo que conduzca a la elección de un modo de arranque.

Hipótesis de cálculo

Motor asíncrono de:

- potencia nominal $P_n = 1\,500$ kW,
- tensión nominal $U_n = 5\,500$ V,
- rendimiento x factor de potencia:

$$\eta \times \cos \varphi = 0,84,$$

- relación del par de arranque al par nominal a tensión nominal:

$$\frac{C_d}{C_n} = 0,8$$

- relación corriente de arranque a corriente nominal a tensión nominal:

$$\frac{I_d}{I_n} = 5$$

- par de puesta en marcha de la máquina arrastrada:

$$0,2 C_n$$

- potencia del transformador principal de alimentación:

$$P_t = 3 \text{ MVA}$$

- potencia aparente máxima de punta soportada por la red del transformador:

$$S_t = 6 \text{ MVA.}$$

Otros datos necesarios para el cálculo:

- característica par - velocidad C (N) del motor,

- característica par resistente - velocidad C_r (N) de la máquina arrastrada,

- suministro del transformador a otros consumos, aparte del motor: 1 200 kVA bajo un $\cos \varphi' = 0,87$.

Método general

La pretensión del proyectista es la de buscar la mejor elección técnico-

económica. Para ello conviene ensayar, de entrada, si la solución más simple y económica es válida; y si ésta no conviene, ensayar otras soluciones siguiendo el orden de la tabla de la **figura 34**.

Arranque directo

Potencia aparente del motor al principio del arranque:

$$S_m = \frac{P_n}{\eta \cdot \cos \varphi} \cdot \frac{I_d}{I_n} =$$

$$= \frac{1\,500}{0,84} \cdot 5 = 8\,925 \text{ kVA}$$

con un factor de potencia al arranque:

$$\cos \varphi_d = 0,5, \text{ o sea, } \varphi_d = 81^\circ.$$

Esta potencia se suma vectorialmente a la que cede el transformador a las restantes salidas (**figura 35**).

Gráficamente se deduce el valor total de la potencia aparente solicitada al transformador:

$$S \approx 9\,580 \text{ kVA.}$$

Siendo la máxima potencia de punta permitida de 6 000 kVA, no es posible el arranque directo.

Arranque por reactancia

La introducción de una reactancia permite reducir la potencia aparente absorbida por el motor.

La potencia disponible para el arranque se determina gráficamente (**figura 35**).

Al arrancar el motor, la presencia de la reactancia hace que el factor de potencia esté próximo a cero, o sea, $\varphi_d \approx 90^\circ$.

$\vec{OA} = 1\,200$ kVA: potencia del transformador utilizada para las otras salidas.

$\vec{OB} = S_t = 6\,000$ kVA: potencia aparente máxima autorizada.

La potencia aparente disponible para el arranque (motor + reactancia) se deduce gráficamente:

$$\vec{AB} = S_d = 5\,300 \text{ kVA}$$

Reducción de la potencia que debe obtenerse con la reactancia:

$$\frac{S_d}{S_m} = \frac{5\,300}{8\,925} \approx 0,6$$

Si I'_d es el nuevo valor de la corriente de arranque.

$$S_d = U_n \cdot I'_d \cdot \sqrt{3}$$

$$S_m = U_n \cdot I_d \cdot \sqrt{3}$$

$$\text{o sea: } I'_d = 0,6 \cdot I_d$$

Por otra parte:

$$\frac{I'_d}{I_d} = \frac{U_d}{U_n} = 0,6$$

La tensión en bornes del motor tiene un valor $U_d = 0,6 U_n$. El problema queda resuelto desde el punto de vista eléctrico, sólo resta verificar si esta solución es válida desde el punto de vista mecánico.

soluciones de arranque

directo

reactancia

autotransformador

critérios de aceptación

punta de potencia compatible con la red

- par de arranque superior al par resistente de puesta en marcha

- punta de corriente (al aplicar la plena tensión al motor) aceptable para la red

ídem

Fig. 34: Criterios determinantes del modo de arranque de un motor.

A tensión constante U_n , la punta de corriente lado red es, pues: $0,513 I_d$.
 Determinación de la tensión reducida de arranque U_d .

La igualdad de potencias primaria y secundaria del autotransformador permite escribir:

$$0,513 \cdot I_d \cdot U_n = I''_d \cdot U_d$$

I''_d corriente de arranque a la tensión reducida lado motor:

$$0,513 \cdot I_d \cdot U_n = I_d \cdot \frac{U_d}{U_n} \cdot U_d$$

de donde se deduce que:

$$\left(\frac{U_d}{U_n}\right)^2 = 0,513$$

o sea $U_d = 0,718 U_n$.

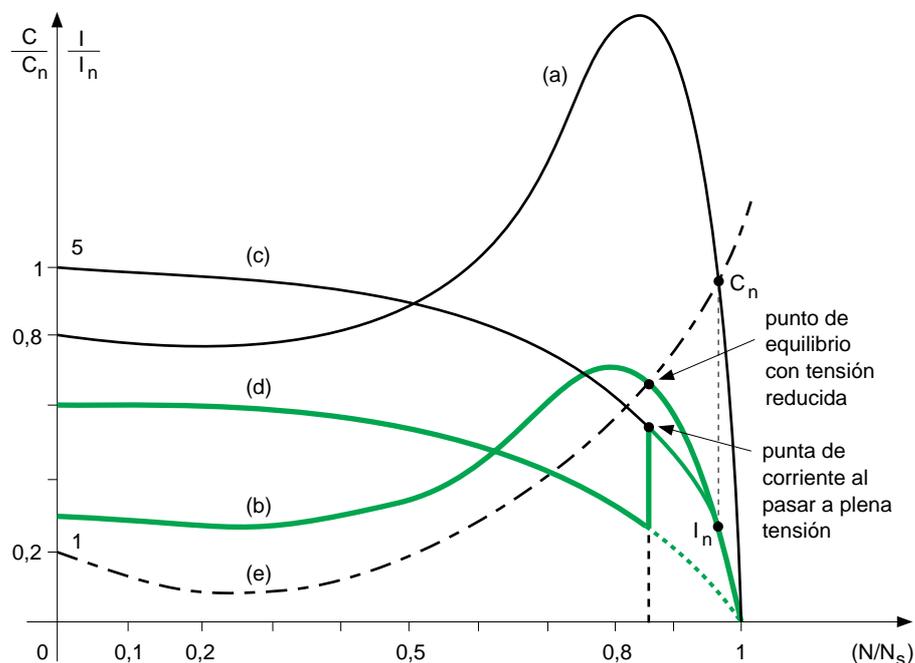
Nuevo par de arranque

$$0,8 C_n \cdot \left(\frac{U_d}{U_n}\right)^2 = 0,41 C_n$$

Valor suficiente para permitir que pueda efectuarse el arranque.

Nota 2

En este motor, para un par de puesta en marcha superior a $0,41 C_n$, no es posible el arranque estático. Será necesario utilizar o bien un motor a rotor bobinado con arranque rotórico, o bien un motor de jaula de ardilla especialmente adaptado que posea un fuerte par de arranque.



- a: curva C (N) a plena tensión
- b: curva C (N) a tensión reducida (0,6 U_n)
- c: curva I (N) a plena tensión
- d: curva I (N) a tensión reducida (0,6 U_n)
- e: curva C_r (N)

Fig. 36: Curvas de par e intensidad para arranque por reactancia.

Anexo 2: Coordinación de las protecciones

Cuando se ha realizado la elección de las protecciones en función de las exigencias de la explotación, es necesario asegurar su coordinación para aprovechar al máximo sus posibilidades. Debe buscarse un equilibrio entre una desconexión intempestiva y un retardo en la eliminación de un defecto. El estudio de las curvas $t(I)$ del relé, del fusible y del poder de ruptura del contactor resuelve el problema de la coordinación de las protecciones. Las características del motor considerado en el ejemplo son las siguientes:

- $P_n = 550 \text{ kW}$,
- $U_n = 3\,150 \text{ V}$,
- $I_n = 130 \text{ A}$,
- $I_d = 5 I_n$.

El contactor es del tipo: Rollarc - fusible.

Naturaleza de las protecciones

- relé térmico de desconexión indirecto, regulado a $I_n = 130 \text{ A}$ para las sobrecargas,
- relé de componente directa, regulado a $6 I_n$, temporizado a $0,05 \text{ s}$, para los defectos equilibrados,
- relé de máxima de componente inversa regulado a $0,3$ ó $0,4 I_n$, temporizado a $0,6 \text{ s}$.

En el caso de una red con desequilibrios casi permanentes se utiliza un relé con dos umbrales:

- un umbral bajo temporizado, regulado justo por encima de la tasa de componente inversa admitida permanentemente,
- un umbral alto instantáneo contra el corte de una fase.

La desconexión instantánea por el relé de componente directa permite utilizar el contactor en las mejores condiciones de su poder de corte y evita la fusión del cortacircuitos-fusible.

El análisis de las curvas de la **figura 37** muestra que el motor y la red quedan protegidos contra:

■ los desequilibrios de $0,3 I_n$ a $10 I_n$, aproximadamente,

■ los defectos equilibrados de $6 I_n$ a $28 I_n$.

Los fusibles intervienen únicamente al sobrepasar de $15 I_n$ para los

defectos desequilibrados y de $25 I_n$ para los defectos equilibrados.

La corriente máxima que el contactor puede llegar a cortar tiene por valor : $28 I_n = 3\,640 \text{ A}$.

Este valor queda muy por debajo de su poder de corte de 10 kA .

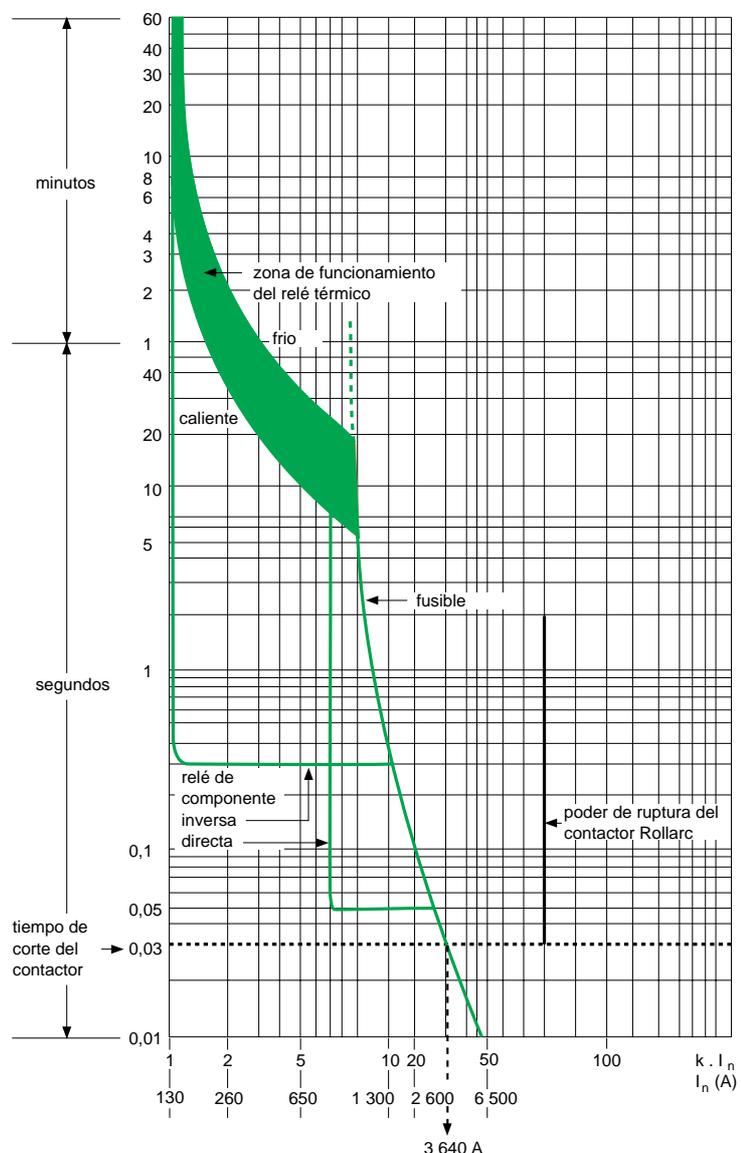


Fig. 37.