



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

***“COMPARACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE MOTORES,
DE ARRANCADORES MAGNÉTICOS Y POR SCR”.***

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

AREA: ELECTRICA - ELECTRONICA

P R E S E N T A:

DAVID MAURO MORALES PAVÓN

ASESOR: ING. ABEL VERDE CRUZ

SAN JUAN DE ARAGÓN, MÉXICO 2014





Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



Agradecimientos

A la vida, a la suerte que me permite estar aquí, en este preciso momento.

Al ingeniero ABEL VERDE CRUZ le estaré agradecido por haberme apoyado en este proyecto en el cual me instruyo y dirigió, con gran paciencia, al tener la astucia necesaria de haberme entendido la propuesta que tenía en mente y con su apoyo poder concluir mis estudios universitarios.

A mis padres por haberme apoyado incondicionalmente en todas y cada una de las actividades que he llevado a cabo en el transcurso de mi vida, así como por el amor y el buen ejemplo que me han y siguen dando.

A mi hermana que en el momento más difícil de mi vida, asumió el papel de un "padre", dándome su apoyo y su cariño incondicional.

A mis hermanos que han sido una parte importante de mi vida enseñándome no solo el oficio en el cual me desempeño, también han sido un apoyo y un buen ejemplo.

A Gran parte de mi familia, que me han apoyado y se preocupan por mí.

A mis amigos que siempre me ayudaron y me impulsaron a salir adelante, pero lo más importante, me dieron su amistad sincera.

A la UNAM y a la FES ARAGON, de la cual estoy orgulloso de pertenecer, así como todo lo que aprendí en esta gran institución.

Siempre estaré en deuda permanente.

Jamás voy a olvidarlos.

GRACIAS!!!!!!



Índice.

Objetivo.....	7
Justificación.....	7
Introducción:	8
CAPÍTULO 1 LEYES Y PRINCIPIOS QUE FUNDAMENTAN EL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR ELÉCTRICO.....	10
1.1.1 Maquina eléctrica.....	10
1.1.2 Movimiento rotatorio, ley de newton y relaciones de potencia.	10
1.1.3 El campo magnético.....	15
1.1.4 Ley de Faraday: voltaje inducido por un campo magnético variable.	17
1.1.5 Producción de fuerza inducida en un alambre.	20
1.1.6 Voltaje inducido en un conductor que se mueve en un campo magnético.	21
1.2.1 Construcción del motor tipo jaula de ardilla.....	21
1.2.2 Conceptos básicos sobre motores de inducción.....	22
1.2.3 Circuito equivalente de un motor de inducción.	25
1.3.1 Introducción a los motores de inducción monofásicos.....	30
1.4.1 Motores de inducción trifásicos.....	36
1.4.2 Principios de funcionamiento.	36
1.4.3 Características del par de torsión.....	40
1.4.4 Diseño del motor.....	43
1.4.5 Características de funcionamiento.....	44
CAPITULO 2 ARRANQUE DE MOTORES ELECTRICOS.....	47
2.1.1 Definición de conceptos básicos.	47
2.1.2 Arranque de motores sincrónicos.....	47
2.1.3 Valores nominales en los motores sincrónicos.....	55
2.2.1 Arranque de motores de inducción monofásicos.....	56
2.2.2 Arrancadores para motores dc.	65
2.3.1 Arranque de motores asíncronos trifásicos.	72
2.3.2 El autotransformador.....	84
2.3.3 Conexión interna de motores.	90
2.4.1 Criterios a considerar para una adecuada selección de un motor trifásico de inducción. ..	95
CAPITULO 3 FUNDAMENTOS DE ELECTRONICA DE POTENCIA Y ARRANCADORES DE ESTADO SOLIDO (ARRANCADORES SUAVES).....	110
3.1.1 Normas y homologaciones de simbología eléctrica.....	110
3.1.2 Símbolos de uso general.	113
3.1.3 Esquemas eléctricos.....	133



3.1.4 Reglas básicas para realizar la lectura e interpretación de esquemas eléctricos.	140
3.1.5 Código para formar la parte 3a del bloque de identificación.	142
3.1.6 Código de letras para determinar la función.	145
3.2.1 Componentes de electrónica de potencia.....	146
3.2.2 Circuitos rectificadores básicos.	155
3.2.3 Circuitos de pulsos.....	160
3.2.4 Variación de voltaje mediante control de fase ac.....	163
3.2.5 Control de potencia dc a dc: recortadores.....	170
3.2.6 Inversores.....	178
3.2.7 Cicloconvertidores.....	193
3.2.8 Problemas de armónicas.....	203
3.3.1 Arrancadores electrónicos o de estado sólido.....	206
3.3.2 Principio del control de fase usando elementos semiconductores para arrancadores suaves.....	209
3.3.3 Circuito derivado de fuerza de un motor, con arrancador de estado sólido.....	212
3.3.4 Comparación con los arrancadores a tensión reducida por el método de conexión estrella – delta.....	213
3.3.5 Tipos de conexiones del arrancador suave al motor estándar (3 cables).....	216
.....	216
3.3.6 Arranques secuenciales.....	221
3.3.7 Soft starters “arrancadores suaves”. Arrancadores Electronicos o de estado sólido para motores eléctricos De inducción de c. A.....	227
3.3.8 Arrancador iec inteligente telemecanique tesys u.....	228
3.4.1Relé de estado sólido (SSR).....	231
3.4.2 Protección de ssrs.	233
CAPÍTULO 4 ARRANCADORES MAGNÉTICOS.	239
4.1.1 El arrancador magnético.	239
4.1.2 Arrancadores manuales de cc y ca.....	239
4.1.3 Puesta en marcha y aceleración de motores de cc.....	240
4.1.4 Arrancador comercial de tres bornes.....	242
4.1.5 Arrancador comercial de cuatro bornes.	244
4.1.6 Arrancadores manuales de motor serie.....	247
4.1.7 Regulador manual de tambor.	248
4.1.8 Arranque manual de motores de inducción de jaula de ardilla (scims).....	251
4.1.9 Arranque manual de motores de inducción de rotor bobinado (wrims).....	254
4.1.10 Arranque manual de motores síncronos polifásicos.....	255



4.1.11 Arranque manual de motores monofásicos.....	257
4.2.1 Arrancadores automáticos de c.c.....	258
4.2.2 Arrancador de aceleración de tiempo fijo, c.c, que utiliza contactores de acción retardada.	259
4.2.3 Arrancador de aceleración por tiempo fijo, de c.c que utiliza relés de amortiguador.	260
4.2.4 Arrancador de aceleración por tiempo fijo, de c.c, que utiliza un temporizador motorizado o un mecanismo de tiempo.	262
4.2.5 Arrancador de aceleración por tiempo definido, de c.c., que utiliza constante de tiempo inductiva de relés de bobina de retención.....	264
4.2.6 Arrancador de aceleración por limitación de corriente, de c.c., que utiliza relés de f.c.e.m. (método por limitación de la velocidad).	266
4.2.7 Arrancador de aceleración por limitación de la corriente, de c.c, que utiliza relés de retención de bobina de retención.....	269
4.2.8 Arrancadores de aceleración limitador de la corriente, de c.c. que utiliza relés en serie.	270
4.2.9 Arrancador de aceleración por limitación de la corriente, de c.c., que utiliza bobinas de retención (aceleración por caída de tensión).	272
4.2.10 Arrancador de aceleración por limitación de la corriente, de c.a., que emplea bobinas de retención y amplificador magnético.	274
4.3.1 Arrancadores automáticos de c.a.	276
4.3.2 Arrancador magnético automático a plena tensión.	277
4.3.3 Arrancadores automáticos de aceleración de tiempo fijo de tensión reducida, de c.a. ..	279
4.3.4 Circuito arrancador de temporizador de neón.	283
4.3.5 Arranque de un motor de inducción de rotor bobinado (wrim).....	286
4.3.6 Arrancadores de wrim en bucle cerrado.....	289
4.3.7 Arrancadores automáticos para motores síncronos.....	293
CAPÍTULO 5 SELECCIÓN DE ELEMENTOS PARA ARRANQUE DE MOTORES ELÉCTRICOS Y COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ARRANQUE.	295
5.1.1 Comando y protección de motores eléctricos.	295
5.2.1 Otros dispositivos de protección.....	303
5.2.2 Coordinación de las protecciones de una salida a motor.	304
5.3.1 Conexión de los distintos elementos de una salida a motor (diagramas de comando). ...	306
5.4.1 conexión de un motor trifásico.	308
5.5.1 Funcionamiento y selección para un arranque de motor directo.	311
5.5.2 Funcionamiento y selección para un arranque estrella-triángulo.	313
5.5.3 arrancadores suaves.	314
5.6.1 Selección de elementos de control para arranque estrella –delta de motor de 10 hp 60hz.	325



5.6.2 Calculando la corriente de corto circuito aplicando el método directo motores (< 50 hp).	326
5.6.3 Selección de elementos aplicando los criterios de selección.	327
CONCLUSIONES.	333
Bibliografía.	336



Objetivo.

Complementar los conocimientos adquiridos en la carrera de ingeniería mecánica eléctrica, Relacionando los conceptos básicos de los motores eléctricos, así como comparar los diferentes tipos de arranques para motores eléctricos, analizando sus ventajas y desventajas enfocándonos en el arranque estrella- triangulo para motores trifásicos, analizando su importancia y por qué es utilizado frecuentemente en la industria.

Justificación.

La presente tesis hace mención a los tipos de motores que existen, así como las leyes y principios que fundamentan el funcionamiento de los motores eléctricos, así como los diferentes tipos de arranque para los antes mencionados, haciendo énfasis en los arranques para motores trifásicos, siendo el objetivo de esta tesis la comparación entre los diferentes tipos de arranque para motores trifásicos jaula de ardilla, desde el arranque directo hasta el convertidor de frecuencia.



Introducción:

Los motores eléctricos son máquinas utilizadas en transformar energía eléctrica a mecánica. Los motores son utilizados en la industria, pues combinan las ventajas del uso de la energía eléctrica (bajo, costo, facilidad de transporte, limpieza y simplicidad de la puesta en marcha, etc.) con una construcción relativamente simple, costo reducido y buena adaptación a los más diversos tipos de carga.

De acuerdo a la fuente de tensión que alimente al motor, podemos realizar la siguiente clasificación:

Motores de corriente directa (CD)

Motores de corriente alterna (CA)

Otros motores

Debido a las restricciones impuestas por la normatividad eléctrica a los valores pico de corriente posibles en las líneas, es necesario que los motores eléctricos sean arrancados de manera que los valores pico de corriente durante el arranque sean lo suficientemente bajos para evitar las altas caídas de tensión en la red.

Este arranque brusco de los motores de corriente alterna supone un alto costo que hay que pagar de diversas formas, las cuales son:

- Problemas eléctricos debidos a las tensiones y corrientes transitorias producidas durante el arranque de los motores. Estos fenómenos transitorios pueden sobrecargar la red de alimentación local y producir variaciones inaceptables de tensión, con interferencias en otros equipos eléctricos conectados a la misma red.
- Problemas mecánicos que someten a grandes esfuerzos a toda la cadena de accionamientos, desde el motor hasta el equipo accionado.
- Problemas funcionales, tales como sobrepresiones en las tuberías, daños en los productos transportados por las cintas y marcha poco confortable de las escaleras mecánicas.
- Las consecuencias económicas son considerables: cada problema técnico o avería tiene un costo en forma de reparaciones y parada de la producción. Este último factor es el que predomina en la industria.

Para solucionar estos problemas dependiendo de la aplicación del motor, es que se analizaran las diferentes formas de arranque para los motores trifásicos de inducción jaula de ardilla.



Capítulo 1:

En este capítulo se hace mención a las leyes y principios que fundamentan el funcionamiento de los motores eléctricos.

Capítulo 2:

En este capítulo se hace mención a los métodos de arranque para los diferentes tipos de motores eléctricos, también se definen conceptos básicos sobre la naturaleza de las corrientes.

Capítulo 3:

En este capítulo se hace mención a los fundamentos de la electrónica de potencia así como su importancia para el control de motores eléctricos, también se hace mención del funcionamiento de los arrancadores suaves, así como sus ventajas y desventajas.

Capítulo 4:

En este capítulo se hace mención al concepto de arrancador magnético, así como a sus dos principales tipos (manuales y automático), y las variaciones de estos.

Capítulo 5:

En este capítulo se hace mención de los tipos de arranque para motores trifásicos, pasando desde el arranque directo hasta el convertidor de frecuencia, se dan las características de los elementos básicos de control para motores trifásicos así como, así como los criterios de selección de los mismos, se hace una comparación entre los diferentes tipos de arranque analizando sus ventajas y desventajas, con un ejemplo sencillo se ejemplifica la selección de elementos para un arrancador estrella-triángulo.



CAPÍTULO 1 LEYES Y PRINCIPIOS QUE FUNDAMENTAN EL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR ELÉCTRICO.

1.1.1 Máquina eléctrica.

Una máquina eléctrica es un dispositivo que puede convertir energía mecánica en energía eléctrica o energía eléctrica en energía mecánica. Cuando este dispositivo es utilizado para convertir energía mecánica en energía eléctrica, se denomina generador; cuando convierte energía eléctrica en energía mecánica, se llama motor.

Puesto que puede convertir energía eléctrica en mecánica o viceversa una máquina eléctrica puede utilizarse como generador o como motor. Casi todos los motores y generadores útiles convierten la energía de una a otra forma a través de la acción de campos magnéticos.

Otro aparato relacionado con los motores y los generadores es el transformador. Un transformador es un dispositivo que convierte energía eléctrica de corriente alterna de cierto nivel de voltaje en energía eléctrica de corriente alterna de otro nivel de voltaje. Puesto que los transformadores operan sobre los mismos principios que los generadores y los motores, dependiendo de la acción de un campo magnético para llevar a cabo el cambio del nivel de voltaje, se estudian junto con aquéllos.

Estos tres tipos de dispositivos eléctricos se encuentran en cualquier campo de la vida cotidiana moderna. En el hogar, los motores eléctricos hacen funcionar enfriadores, congeladores, aspiradoras, ventiladores, equipos de aire acondicionado, licuadoras y otros muchos aparatos similares. En los talleres, los motores suministran la fuerza motriz para casi todas las herramientas. En consecuencia, los generadores son necesarios para suministrar la energía a todos estos motores.

1.1.2 Movimiento rotatorio, ley de newton y relaciones de potencia.

Casi todas las máquinas eléctricas rotan sobre un eje llamado eje de la máquina. Debido a la naturaleza rotatoria de la máquina, es importante tener un conocimiento básico del movimiento rotatorio.

En general, se requiere un vector tridimensional para describir la rotación de un objeto en el espacio. Sin embargo, dado que las máquinas giran sobre un eje fijo, su rotación queda restringida a una dimensión angular. Con relación a un extremo del eje de la máquina, la dirección de rotación puede ser descrita ya sea en sentido de las manecillas del reloj (CW) o en sentido contrario a las manecillas del reloj (CCW). Para los propósitos de este volumen, un ángulo de rotación en sentido contrario a las manecillas del reloj será positivo y en sentido de las manecillas del reloj, se asumirá negativo. Para la rotación sobre un eje fijo, todos los conceptos de esta sección se reducen a magnitudes escalares.

En seguida se definen los conceptos importantes del movimiento rotatorio y se relacionan con la idea correspondiente en el movimiento rectilíneo.

Posición angular θ

La posición angular θ de un objeto es el ángulo en que se sitúa, medido desde algún punto arbitrario de referencia. La posición angular se mide en radianes o



grados; corresponde al concepto de distancia en el movimiento rectilíneo.

Velocidad angular ω

La velocidad angular es la tasa de cambio de la posición angular con respecto al tiempo. Es positiva si la rotación es contraria a la dirección de las manecillas del reloj. La velocidad angular corresponde al concepto de velocidad lineal. Así como la velocidad lineal unidimensional está definida por la ecuación

$$v = \frac{dr}{dt}$$

La velocidad angular se define mediante la ecuación

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

Si las unidades de la posición angular están en radianes, la velocidad angular se mide en radianes por segundo.

En general, la velocidad angular se expresa en revoluciones por segundo o revoluciones por minuto. Puesto que la velocidad angular es un concepto tan importante en el estudio de las máquinas, es costumbre utilizar diferentes símbolos para la velocidad cuando se expresa en unidades diferentes, lo cual permite minimizar cualquier posible confusión en cuanto a las unidades.

Los siguientes símbolos se utilizan para describir la velocidad angular:

ω_m Velocidad angular expresada en radianes por segundo

f_m Velocidad angular expresada en revoluciones por segundo

n_m Velocidad angular expresada en revoluciones por minuto

En estos símbolos el subíndice m indica una cantidad mecánica en contraposición a una cantidad eléctrica. Si no existe posibilidad alguna de confusión entre las cantidades mecánica y eléctrica, se omite el subíndice.

Estas medidas de velocidad del eje se relacionan entre sí mediante las siguientes ecuaciones

$$n_m = f_m$$
$$f_m = \frac{\omega_m}{2\pi}$$

Aceleración angular α

La aceleración angular es la tasa de cambio de la velocidad angular con respecto al tiempo. Es positiva si la velocidad angular se incrementa en sentido algebraico. La aceleración angular corresponde a la aceleración en el movimiento rectilíneo.

La aceleración angular se define mediante la ecuación

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt}$$

Si las unidades de la velocidad angular están en radianes por segundo, la aceleración angular se mide en radianes por segundo cuadrado.

Par τ

En el movimiento rectilíneo, una fuerza aplicada sobre un objeto ocasiona un cambio de velocidad en éste. Si no se ejerce una fuerza neta sobre el objeto, su



velocidad permanece constante. Cuanto mayor sea la fuerza aplicada al objeto, más rápidamente cambiará su velocidad.

En el movimiento rotatorio, existe un concepto similar. Cuando un objeto rota, su velocidad permanece constante a menos que se ejerza un par sobre él. Cuanto mayor sea el par aplicado al objeto, más rápidamente cambiará su velocidad angular. El par sobre un objeto se define como el producto de la fuerza aplicada al objeto por la distancia mínima entre la línea de acción de la fuerza y el eje de rotación del objeto. Si r es un vector que apunta desde el eje de rotación hasta el punto de aplicación de la fuerza y si F es la fuerza aplicada, el par puede ser descrito como

$$\tau = (\text{fuerza aplicada})(\text{distancia perpendicular})$$

$$= (F)(r \text{sen} \theta)$$

$$= rF \text{sen} \theta$$

Donde θ es el ángulo entre el vector r y el vector F . La dirección del par tendrá el sentido de las manecillas del reloj si tiende a causar la rotación en sentido de las manecillas del reloj y en sentido contrario a las manecillas del reloj, si tiende a causar la rotación en este sentido (fig. 1.1).

Las unidades del par son newton/metro en las unidades del SI y libra/pie en el sistema inglés.

Ley de rotación de Newton

La ley de Newton en cuanto a objetos que se mueven en línea recta describe la relación entre la fuerza aplicada a un objeto y su aceleración resultante. Esta relación está dada por la ecuación: $F = ma$

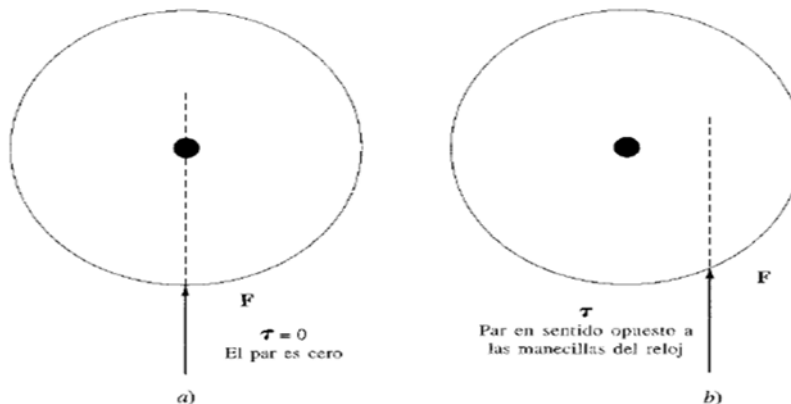


Fig. 1.1 a) Una fuerza aplicada a un cilindro de modo que pase por su eje de rotación $\tau=0$. b) Una fuerza aplicada a un cilindro de manera que su línea de acción no pase por el eje de rotación. Aquí τ va en sentido opuesto a las manecillas del reloj.



Dónde:

F=fuerza neta aplicada al objeto

m=masa del objeto

α =aceleración resultante

En unidades SI, la fuerza se mide en newton, la masa en kilogramos y la aceleración en metros por segundo cuadrado. En el sistema inglés, la fuerza se mide en libras, la masa en slugs y la aceleración en pies por segundo cuadrado.

Una ecuación semejante describe la relación entre el par aplicado a un objeto y su aceleración angular resultante. Esta relación, llamada Ley de rotación de Newton, está dada por la ecuación

$$\tau = J\alpha$$

Donde τ es el par neto aplicado, expresado en newton/metro o libra/pie, y α es la aceleración angular resultante expresada en radianes por segundo cuadrado. El término J , que sirve el mismo propósito de la masa del objeto en el movimiento lineal, representa el momento de inercia del objeto y se mide en kilogramos/metro cuadrado o slug/pie cuadrado.

$$\tau = (\text{distancia perpendicular})(\text{fuerza})$$

$$\tau = (\text{sen}\theta)F, \text{ en sentido inverso a las manesillas del reloj}$$

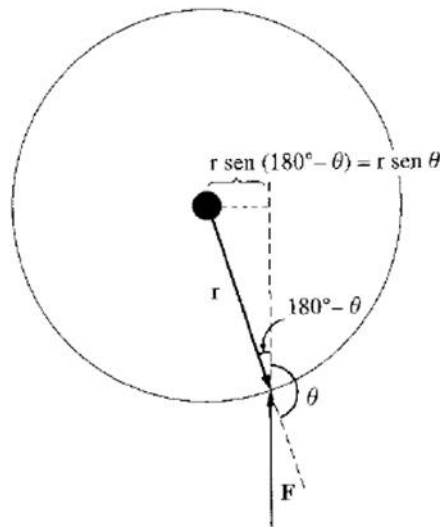


Fig. 1.2 Obtención de la ecuación del par en un objeto.

Trabajo W

En el movimiento lineal, el trabajo se define como la aplicación de una fuerza a través de una distancia, y se expresa mediante la ecuación

$$W = \int F dr$$

Donde se supone que la fuerza es colineal con la dirección del movimiento. Para el caso especial de una fuerza constante aplicada en forma colineal con la dirección del movimiento, esta ecuación se transforma en

$$W = Fr$$

En el sistema SI, la unidad de medida del trabajo es el joule, y la libra/pie en el sistema inglés.



En el movimiento rotatorio, trabajo es la aplicación de un par a través de un ángulo. En este caso la ecuación es

$$\tau = \int f\theta$$

Y si el par es constante,

$$W = \tau\theta$$

Potencia P

La potencia es la razón de cambio del trabajo o el incremento en el trabajo por unidad de tiempo. La ecuación de potencia es

$$P = \frac{dw}{dt}$$

Se mide generalmente en joules por segundo (watts), pero también puede medirse en libra/pie por segundo o en caballos de fuerza (HP).

Aplicando esta definición y suponiendo que la fuerza es constante y colineal con la dirección del movimiento, la potencia está dada por

$$P = \frac{dw}{dt} = \frac{d}{dt}(Fr) = F\left(\frac{dr}{dt}\right) = Fv$$

Así mismo, si el par es constante, en el movimiento rotatorio la potencia está dada por

$$P = \frac{dw}{dt} = \frac{d}{dt}(\tau\theta) = \tau\left(\frac{d\theta}{dt}\right) = \tau\omega$$

$$P = \tau\omega$$

La ecuación siguiente es muy importante en el estudio de las máquinas eléctricas porque describe la potencia mecánica aplicada al eje de un motor o un generador. La siguiente ecuación es la relación correcta entre la potencia, el par y la velocidad, si la potencia está medida en watts, el par en newton/metro y la velocidad en radianes por segundo. Si se utilizan otras unidades para medir cualquiera de las cantidades indicadas, debe introducirse una constante en la ecuación como factor de conversión. Es todavía común en los Estados Unidos medir el par en libra/pie, la velocidad en revoluciones por minuto y la potencia en watts (W) o caballos de fuerza (HP). Si se emplean los factores de conversión adecuados en cada término, la siguiente ecuación se convierte en

$$P(\text{watts}) = \frac{\tau(\text{lb} \cdot \text{pie})n(\text{r/min})}{7.04}$$

$$P(\text{wattscaballosdefuerza}) = \frac{\tau(\text{lb} \cdot \text{pie})n(\text{r/min})}{5252}$$

Donde el par se mide en libra/pie y la velocidad en revoluciones por minuto.



1.1.3 El campo magnético.

Como se indicó antes, los campos magnéticos son el mecanismo fundamental para convertir la energía de c.a. en energía de c.c., o viceversa, en motores, generadores y transformadores. Existen cuatro principios básicos que describen cómo se utilizan los campos magnéticos en estos aparatos

- Un conductor que porta corriente produce un campo magnético a su alrededor.
- Un campo magnético variable con el tiempo induce un voltaje en una bobina de alambre si pasa a través de ésta (ésta es la base del funcionamiento del transformador).
- Un conductor que porta corriente en presencia de un campo magnético experimenta una fuerza inducida sobre él (ésta es la base del funcionamiento del motor).
- Un conductor eléctrico que se mueva en presencia de un campo magnético tendrá un voltaje inducido en él (ésta es la base del funcionamiento del generador).

Esta sección describe y trata sobre la producción de un campo magnético por un conductor que porta corriente, mientras que las secciones posteriores de este capítulo explican los otros tres principios.

Producción de un campo magnético

La ley básica que gobierna la producción de un campo magnético por una corriente es la ley de Ampere

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{net}$$

Donde H es la intensidad de campo magnético producida por la corriente I_{net} . En unidades del SI, I se mide en amperes y H, en amperes-vuelta por metro. Para entender mejor el significado de esta ecuación, es de gran ayuda aplicarla al sencillo ejemplo de la fig.1.3, que muestra un núcleo rectangular con un

devanado de N vueltas de alambre enrollado sobre una de las ramas del núcleo. Si el núcleo es de hierro o algunos metales similares (llamados materiales ferromagnéticos), casi todo el campo magnético producido por la corriente permanecerá dentro del núcleo, de modo que el camino de integración en la ley de Ampère es la longitud media del núcleo l_c .

La corriente que pasa por el camino de integración I_{net} es entonces Ni, puesto que la bobina de alambre corta dicho camino N veces mientras porta la corriente i. La ley de Ampère se expresa entonces

$$Hl_c = Ni$$

Donde H es la magnitud del vector de intensidad de campo magnético H. De esta



manera, la magnitud de intensidad de campo magnético en el núcleo debido a la corriente aplicada es

$$H = \frac{Ni}{l_c}$$

La intensidad de campo magnético H es, de alguna manera, una medida del "esfuerzo" de una corriente por establecer un campo magnético. La potencia del campo magnético producido en el núcleo depende también del material de éste. La relación entre la intensidad de campo magnético H y la densidad de flujo magnético resultante B producida dentro del material está dada por $B = \mu H$

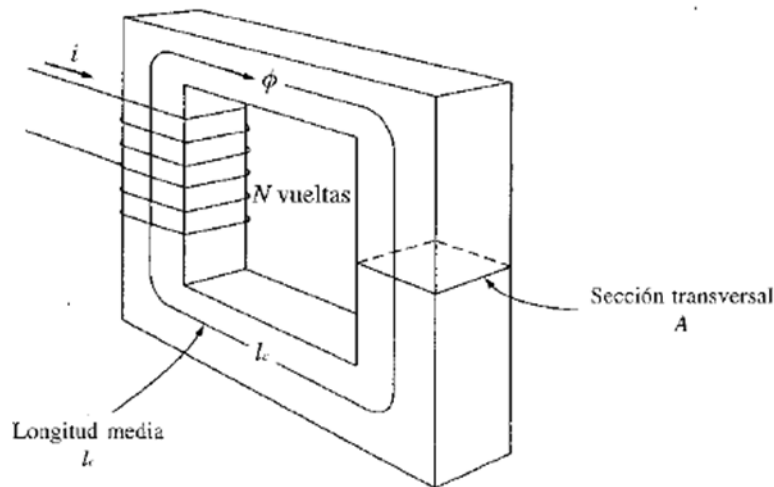


Fig.1.3 Un núcleo magnético sencillo.

Donde:

H = Intensidad de campo magnético

μ =Permeabilidad magnética del material

B =Densidad de flujo magnético resultante

La densidad de flujo magnético real producida en una sección del material está dada entonces por el producto de dos términos:

H Que presenta el esfuerzo de la corriente por establecer un campo magnético

μ Que representa la facilidad relativa para establecer un campo magnético en un material dado

La intensidad de campo magnético se mide en ampere-vuelta por metro, la permeabilidad en henrys por metro y la densidad de flujo resultante en webers por metro cuadrado, conocido como teslas (T).

La permeabilidad del espacio libre se denomina μ_0 y su valor es

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

La permeabilidad de cualquier material comparada con la permeabilidad del espacio libre se denomina permeabilidad relativa:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$



1.1.4 Ley de Faraday: voltaje inducido por un campo magnético variable.

Hasta aquí la atención se ha concentrado en la producción de un campo magnético y sus propiedades. Ahora, se examinará cómo un campo magnético puede afectar sus alrededores. El primer gran efecto que debe considerarse es la ley de Faraday, base del funcionamiento del transformador. La ley de Faraday establece que si un flujo atraviesa una espira de alambre conductor, se inducirá en ésta un voltaje directamente proporcional a la tasa de cambio del flujo con respecto al tiempo, lo cual se expresa mediante la ecuación

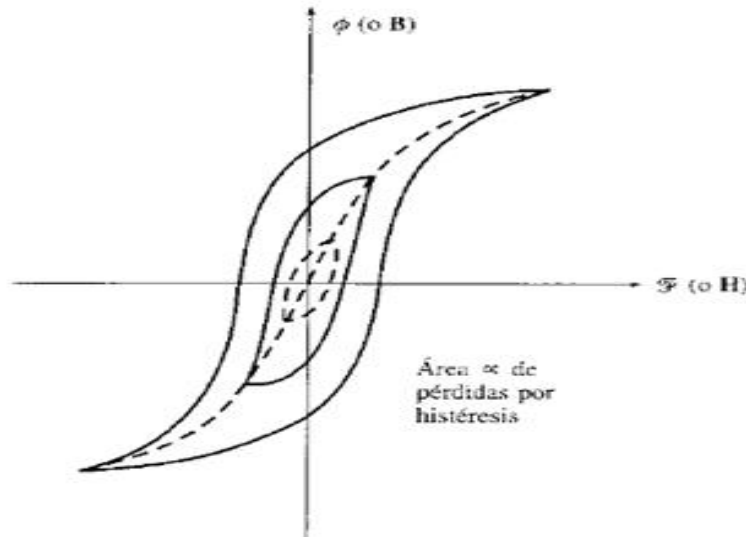


Fig. 1.4 efecto del tamaño de las variaciones de la fuerza magnetomotriz en la magnitud de las pérdidas por histéresis.

$$e_{ind} = \frac{d\phi}{dt}$$

Donde e_{ind} es el voltaje inducido en la espira y ϕ es el flujo que atraviesa la espira. Si una bobina tiene N espiras y el mismo flujo circula en todas, el voltaje inducido en toda la bobina estará dado por

$$e_{ind} = -N \frac{d\phi}{dt}$$

Donde:

$$e_{ind} = \text{voltaje de la bobina}$$

$$N = \text{numero de vueltas en la bobina}$$

$$\phi = \text{Flujo que circula en la bobina}$$

El signo menos en la ecuación es una expresión de la ley de Lenz, lo cual establece que la dirección del voltaje inducido en la bobina es tal que si los extremos de ésta estuvieran en cortocircuito, se produciría en ella una corriente que generaría un flujo opuesto al cambio del flujo inicial. Puesto que el voltaje inducido se opone al cambio que lo causa, se incluye un signo menos en la ecuación. Para entender con claridad este concepto, observe la fig. 1.5. Si el flujo



mostrado en la figura se incrementa, el voltaje que se forma en la bobina tenderá a crear un flujo que se opone a ese incremento. Una corriente que fluya como se muestra en la fig. 1.5b.

Producirá ese flujo opuesto al incremento, y por ello el voltaje formado en la bobina debe tener la polaridad adecuada para dirigir esta corriente hacia el circuito externo. Entonces, el voltaje deberá concentrarse con la polaridad indicada en la figura.

Al utilizar la ecuación anterior en la práctica, se presenta una dificultad mayor puesto que la ecuación establece que hay exactamente la misma cantidad de flujo en cada espira de la bobina. Por desgracia, esto no es verdad debido al flujo que se dispersa en los alrededores de la bobina. Si las espiras están estrechamente ligadas, de modo que la mayor parte del flujo que circula en una espira también circula en las demás, la ecuación anterior dará respuestas válidas. Pero si la dispersión es significativa o si se requiere la máxima exactitud, se necesitará una expresión diferente que no suponga tal hecho. La magnitud del voltaje en la i -ésima espira de la bobina está dada siempre por

$$e_{ind} = -N \frac{d(\phi_i)}{dt}$$

Producirá ese flujo opuesto al incremento, y por ello el voltaje formado en la bobina debe tener la polaridad adecuada para dirigir esta corriente hacia el circuito externo. Entonces, el voltaje deberá concentrarse con la polaridad indicada en la figura. Puesto que la polaridad del voltaje puede deducirse del análisis físico, el signo menos de las ecuaciones se omite frecuentemente.

Al utilizar la anterior ecuación en la práctica, se presenta una dificultad mayor puesto que la ecuación establece que hay exactamente la misma cantidad de flujo en cada espira de la bobina. Por desgracia, esto no es verdad debido al flujo que se dispersa en los alrededores de la bobina. Si las espiras están estrechamente ligadas, de modo que la mayor parte del flujo que circula en una espira también circula en las demás, la ecuación dará respuestas válidas. Pero si la dispersión es significativa o si se requiere la máxima exactitud, se necesitará una expresión diferente que no suponga tal hecho. La magnitud del voltaje en la i -ésima espira de la bobina está dada siempre por $e_{ind} = \frac{d(\phi_i)}{dt}$

Si hay N espiras en la bobina, el voltaje total en ésta es

$$\begin{aligned} e_{ind} &= \sum_{i=1}^N e_i \\ &= \sum_{i=1}^N \frac{d(\phi_i)}{dt} \\ &= \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^N \phi_i \right) \end{aligned}$$

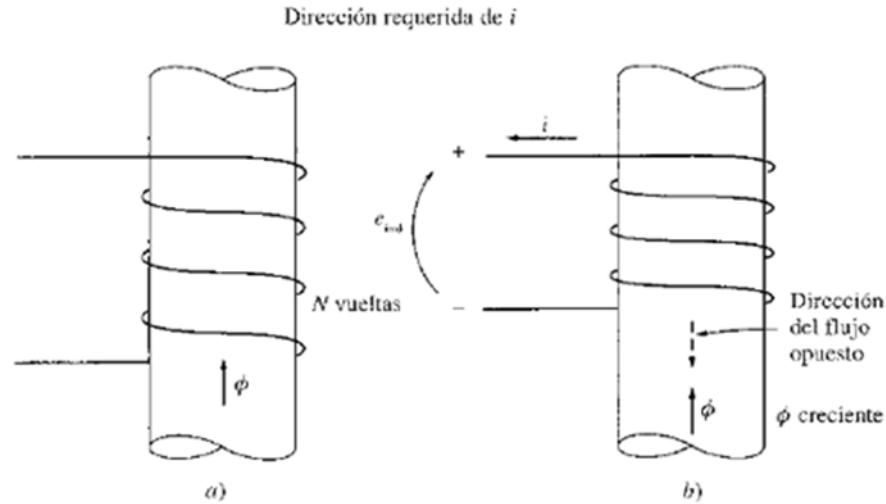


Fig.1.5 Significado de la ley de Lenz. a) una bobina encierra un flujo magnético creciente. b) Determinación de la polaridad del voltaje resultante.

El término entre paréntesis en la ecuación se denomina flujo concatenado (o flujo ligado) λ de la bobina en términos de este flujo, la ley de Faraday puede describirse como

$$e_{ind} = \frac{d\lambda}{dt}$$

Donde

$$\lambda = \sum_{i=0}^n \phi i$$

El flujo concatenado se mide en webers-vuelta.

La ley de Faraday es la propiedad fundamental de los campos magnéticos que intervienen en la operación de los transformadores. El efecto de la ley de Lenz se emplea para predecir la polaridad de los voltajes inducidos en los devanados del transformador.

La ley de Faraday también explica las pérdidas debidas a las corrientes parásitas antes mencionadas. Un flujo variable en el tiempo induce voltaje dentro de un núcleo ferromagnético de la misma forma que lo haría en un alambre conductor enrollado alrededor del mismo núcleo. Estos voltajes causan flujos de corrientes que circulan en el núcleo, similares a los remolinos que se observan desde la orilla de un río; por esta razón reciben también el nombre de corrientes de remolino. Estas corrientes parásitas disipan energía puesto que fluyen en un medio resistivo (el hierro del núcleo), la energía disipada se convierte en calor en el núcleo.

La cantidad de energía perdida debida a las corrientes parásitas es proporcional a la distancia de los caminos recorridos dentro del núcleo. Por esta razón, se acostumbra cortar el núcleo ferromagnético que va a estar sujeto al flujo alterno en pequeñas tiras o láminas, y construirlo con ellas. Para limitar al mínimo los recorridos de las corrientes parásitas, se utilizan resinas aislantes entre las diferentes láminas. Debido a que las capas aislantes son extremadamente delgadas, su efecto sobre las propiedades magnéticas del núcleo es muy pequeño.



1.1.5 Producción de fuerza inducida en un alambre.

Un segundo efecto importante de un campo magnético sobre sus alrededores es el que induce una fuerza sobre un alambre conductor que porta corriente y se encuentra dentro del campo. El concepto básico involucrado se ilustra en la fig. 1.7, que muestra un conductor dentro de un campo magnético uniforme de densidad de flujo B , y que apunta hacia dentro de la página. El conductor mide l metros y porta una corriente de i amperes. La fuerza inducida sobre el conductor está dada por

$$F = i(L \times B)$$

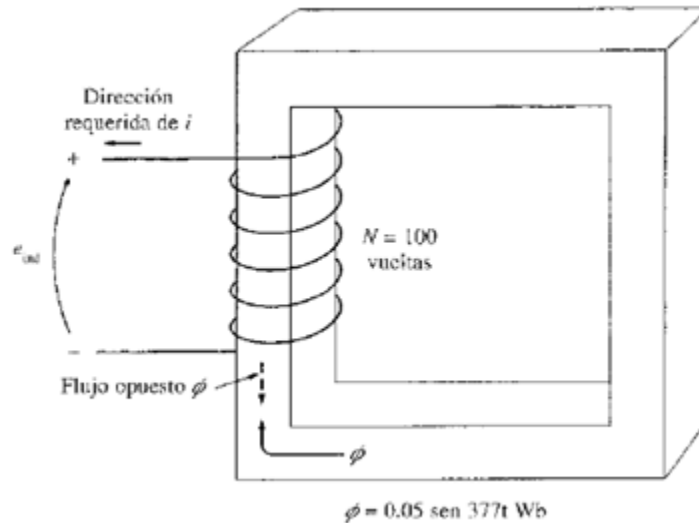


Fig. 1.6 Determinación de los voltajes en las terminales.

Donde

i = magnitud de la corriente en el alambre

L = longitud del alambre, con la dirección de l definida como la dirección del flujo de corriente

B = vector de densidad de flujo magnético

La dirección de la fuerza está dada por la regla de la mano derecha: si el dedo

índice de la mano derecha apunta en la dirección del vector l y el dedo del corazón apunta en la dirección del vector de densidad de campo B , entonces el dedo pulgar apuntará en dirección de la fuerza resultante sobre el alambre. La magnitud de esta fuerza está dada por la ecuación

$$F = iLB \sin \theta$$

Donde θ es el ángulo comprendido entre el alambre y el vector de densidad de flujo.

La inducción de una fuerza en un alambre conductor que porta corriente en presencia de un campo magnético es la base de la acción motriz. Casi todo tipo de motor se basa en este principio básico para las fuerzas y pares que lo mueven.



1.1.6 Voltaje inducido en un conductor que se mueve en un campo magnético.

Hay una tercera forma importante de interacción entre un campo magnético y su alrededor. Si un alambre conductor orientado de manera adecuada se desplaza a través de un campo magnético, se induce un voltaje en aquél. Esta idea se ilustra en la fig. 1.7. El voltaje inducido en el alambre está dado por

$$e_{ind} = -N(v \times B) \cdot L$$

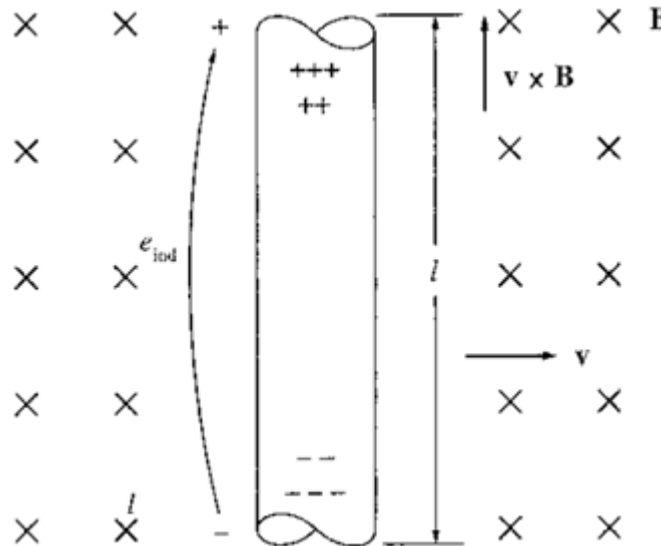


Fig. 1.7 Un conductor que se mueve en presencia de un campo magnético.

Donde

V = velocidad del alambre

B = vector de densidad de flujo

L = longitud del conductor en el campo magnético

El vector **L** apunta en la dirección del alambre hacia el extremo que forma el ángulo más pequeño con respecto al vector $v \times B$. El voltaje en el alambre se inducirá de modo que su extremo positivo esté en la dirección del vector $v \times B$.

1.2.1 Construcción del motor tipo jaula de ardilla.

Un motor de inducción tiene físicamente el mismo estator que una máquina sincrónica, pero la construcción del rotor es diferente. Un estator típico de dos polos se muestra en la figura. Parece (y es) igual al estator de una máquina sincrónica. Hay dos tipos diferentes de rotores que pueden disponerse dentro del estator del motor de inducción. Uno de ellos se llama rotor de jaula de ardilla o simplemente rotor de jaula, mientras que el otro es llamado rotor devanado. Un rotor de esta clase consiste en una serie de barras conductoras dispuestas entre ranuras labradas en la cara del rotor y cortocircuitadas en cada extremo por anillos de cortocircuitado. Este diseño hace referencia a un rotor de jaula de ardilla debido a que los conductores examinados en sí mismos se parecerían a los de las ruedas de ejercicio de las ardillas o los hámster's. Están cortocircuitados a través de escobillas montadas en los anillos rozantes. En los motores de inducción de rotor devanado, sus corrientes rotóricas son accesibles en las escobillas del estator, donde pueden ser examinadas y donde se puede insertar resistencia extra al



circuito del rotor. Es posible obtener ventaja de este hecho para modificar la característica par-velocidad del motor. Los motores de inducción de rotor devanado son más costosos que los de rotor de jaula de ardilla y requieren mucho más mantenimiento debido al desgaste asociado a sus escobillas y a sus anillos rozantes. Como resultado de ello, los motores de inducción de rotor devanado son poco utilizados.

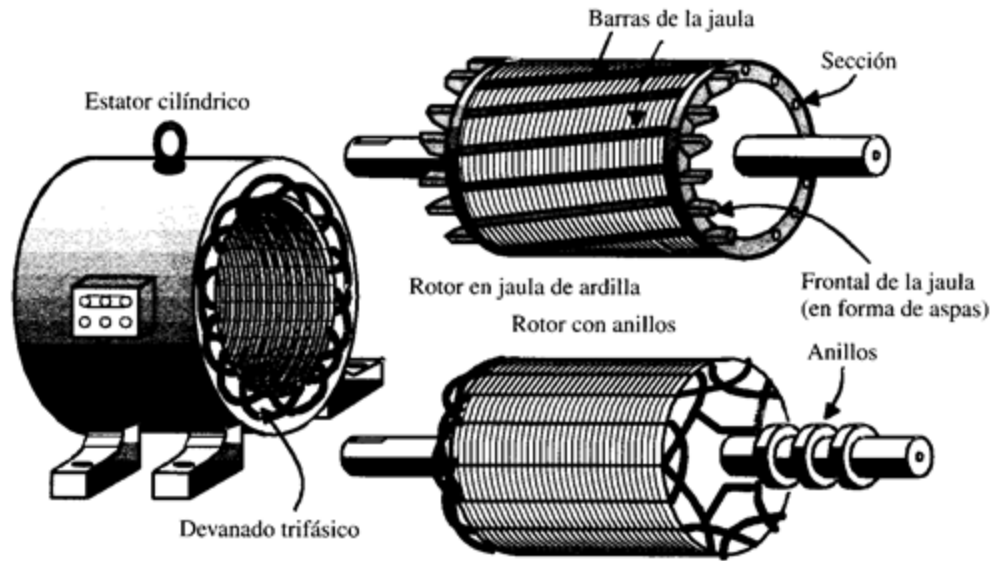


Fig. 1.8 Motor jaula de ardilla

1.2.2 Conceptos básicos sobre motores de inducción.

En esencia, la operación de los motores de inducción es igual a la de los devanados de amortiguación en los motores sincrónicos. En seguida se repasará la operación básica y se definirán algunos términos importantes de los motores de inducción.

Desarrollo del par inducido en un motor de inducción

La fig.1.9 muestra un motor de inducción de jaula de ardilla. Al aplicar al estator un conjunto trifásico de voltajes, un conjunto trifásico de corrientes estatóricas que producen un campo magnético B_s que rota en dirección contraria a las manecillas del reloj. La velocidad de rotación del campo magnético está dada por

$$n_{sinc} = \frac{120f_e}{p}$$

Donde F_e es la frecuencia del sistema, en hertz, y P es el número de polos de la máquina. Este campo magnético rotacional B_s pasa sobre las barras del rotor e induce voltaje en ellas.

El voltaje inducido en una barra determinada del rotor está dado por la ecuación

$$e_{ind} = (v \times B) * L$$

Donde V = velocidad de la barra, relativa al campo magnético.

B = vector de densidad de flujo magnético

L = longitud del conductor en el campo magnético

El movimiento relativo del rotor con respecto al campo magnético del estator produce voltaje inducido en una barra del rotor. La velocidad de las barras de la parte superior del rotor, con relación al campo magnético, tiende hacia la derecha



de modo que el voltaje inducido en las barras superiores tiende hacia fuera de la página, mientras que el voltaje inducido en las barras inferiores tiende hacia dentro de la página. Esto origina un flujo de corriente hacia fuera en las barras superiores, y hacia dentro en las inferiores. Sin embargo, puesto que el conjunto del rotor es inductivo, la corriente pico del rotor queda en atraso con relación al voltaje pico del rotor. El flujo de corriente del rotor produce un campo magnético del rotor B_R

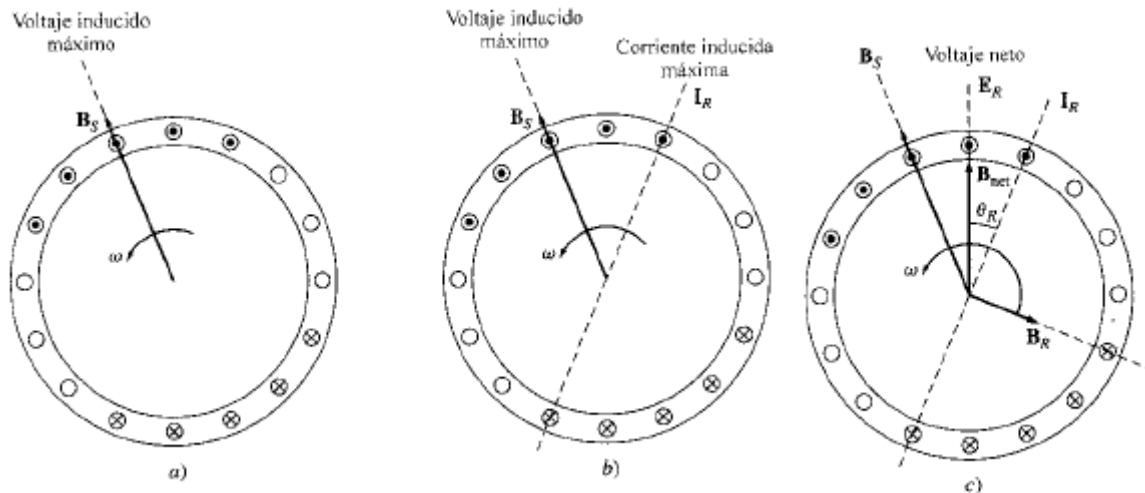


Fig. 1.9 Desarrollo del par inducido en un motor de inducción.

- a) El campo rotacional del estator B_s induce voltaje en las barras del rotor, b) El voltaje del rotor produce un flujo de corriente en el rotor que atrasa el voltaje debido a la inductancia del mismo, c) la corriente del rotor produce un cambio magnético en el rotor B_R que está a 90° detrás de ella y B_R interactúa con B_{net} para producir en la máquina un par en sentido contrario a las manecillas del reloj.

Finalmente, puesto que el par inducido en la máquina está dado por

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_s$$

La dirección del par resultante va en sentido contrario a las manecillas del reloj. Puesto que la dirección del par inducido en el rotor va en sentido contrario a las manecillas del reloj, el rotor se acelera en esa dirección.

Sin embargo, existe un límite superior finito para la velocidad del motor. Si el rotor del motor de inducción estuviera rotando a la velocidad sincrónica, las barras del rotor serían estacionarias con respecto al campo magnético y no habría voltaje inducido. Si e_{ind} fuera igual a 0, no habría corriente en el rotor ni tampoco campo magnético rotórico. Sin campo magnético rotórico, el par inducido sería cero y el rotor se frenaría como resultado de las pérdidas por rozamiento. En consecuencia, un motor de inducción puede acelerar hasta una velocidad cercana a la de sincronismo pero nunca puede alcanzarla por completo.

Nótese que en operación normal, los campos magnéticos del rotor y el estator B_R y B_s rotan conjuntamente a velocidad sincrónica n_{sinc} mientras que el rotor en sí gira a una velocidad menor.



Concepto de deslizamiento del rotor

El voltaje inducido en una barra del rotor de un motor de inducción depende de la velocidad del rotor con respecto a los campos magnéticos. Puesto que el comportamiento de un motor de inducción depende del voltaje y la corriente del rotor, con frecuencia es más lógico hablar de su velocidad relativa. En general se utilizan dos términos para definir el movimiento relativo entre el rotor y los campos magnéticos. Uno de ellos es la velocidad de deslizamiento, definida como la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor:

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m$$

Donde n_{des} = *velocidad de deslizamiento de la maquina*

n_{sinc} = *Velocidad de los campos magneticos*

n_m = *Velocidad mecanica deleje del motor*

El otro término utilizado para describir el movimiento relativo es el deslizamiento, el cual es la velocidad relativa expresada sobre una base en por unidad o en porcentaje. El deslizamiento está definido como

$$S = \frac{n_{des}}{n_{sinc}} (x100\%)$$

$$S = \frac{n_{des} - n_m}{n_{sinc}} (x 100\%)$$

Esta ecuación también puede expresarse en términos de la velocidad angular (o radianes por segundo) como

$$S = \frac{\omega_{sinc} - \omega_m}{\omega_{sinc}} (x 100\%)$$

Nótese que si el rotor gira a la velocidad sincrónica, $s = 0$, mientras que si el rotor está estacionario, $s=1$. Todas las velocidades normales de los motores caen dentro de estos dos límites.

Es posible expresar la velocidad mecánica del eje del rotor en términos de la velocidad sincrónica y el deslizamiento. Resolviendo las ecuaciones para la velocidad mecánica se obtiene

$$n_m = (1 - s)n_{sinc}$$

$$\omega_m = (1 - s)\omega_{sinc}$$

Estas ecuaciones son útiles en la deducción del par del motor de inducción y en las relaciones de potencia.

Frecuencia eléctrica en el rotor

Un motor de inducción trabaja induciendo tensiones y corrientes en el rotor de la máquina; por esa razón, a veces se le llama transformador rotante. Como transformador, el primario (estator) induce un voltaje en el secundario (rotor) pero, a diferencia del transformador, la frecuencia secundaria no es necesariamente la misma que la frecuencia primaria.

Si el rotor de un motor está bloqueado tal que no puede moverse, el rotor tendrá la misma frecuencia que el estator. Por el contrario, si el rotor gira a velocidad sincrónica, la frecuencia en el rotor será cero.



$n_m = 0 \text{ r/min}$, la frecuencia del rotor es $f_r = f_e$, y el deslizamiento $s = 1$. A $n_m = n_{sinc}$ la frecuencia del rotor es $f_r = 0 \text{ Hz}$ y el deslizamiento es $s = 0$. Para cualquier velocidad intermedia, la frecuencia del rotor es directamente proporcional a la diferencia entre la velocidad del campo magnético n_{sinc} y la velocidad del rotor n . Puesto que el deslizamiento del rotor está definido la frecuencia del rotor puede ser expresada como

$$f_r = s f_e$$

Existen varias formas alternativas útiles de esta expresión. Una de las expresiones más comunes se obtiene sustituyendo la ecuación del deslizamiento en la ecuación y sustituyendo luego por n . En el denominador de la expresión

$$f_r = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} f_e$$

Pero, $n_{sinc} = 120 f_e \frac{p}{2\pi}$ de la ecuación tal que

$$f_r = (n_{sinc} - n_m) \frac{p}{120 f_e} f_e$$

Entonces

$$f_r = \frac{p}{120} (n_{sinc} - n_m)$$

1.2.3 Circuito equivalente de un motor de inducción.

Para operar, un motor de inducción depende de la inducción de voltajes y corrientes en su circuito rotor desde el circuito del estator (acción transformadora). Debido a que la inducción de voltajes y corrientes en el circuito del rotor de un motor de inducción es en esencia una operación de transformación, el circuito equivalente de un motor de inducción se produce de forma muy similar al circuito equivalente de un transformador. Un motor de inducción es llamado máquina de excitación única (a diferencia de la máquina síncrona de excitación doble) puesto que la potencia es suministrada sólo al circuito del estator. Dado que un motor de inducción no tiene circuito de campo independiente, su modelo no contendrá una fuente de voltaje interno como el voltaje interno generado en una máquina síncrona. Es posible deducir un circuito equivalente de un motor de inducción a partir del conocimiento de los transformadores y de cuanto ya sabemos sobre la variación de la frecuencia del rotor con la velocidad en los motores de inducción.

El modelo de transformador de un motor de inducción

La fig.1.10 muestra un circuito equivalente transformador, por fase, el cual representa la operación de un motor de inducción. Como en cualquier transformador existe cierta resistencia

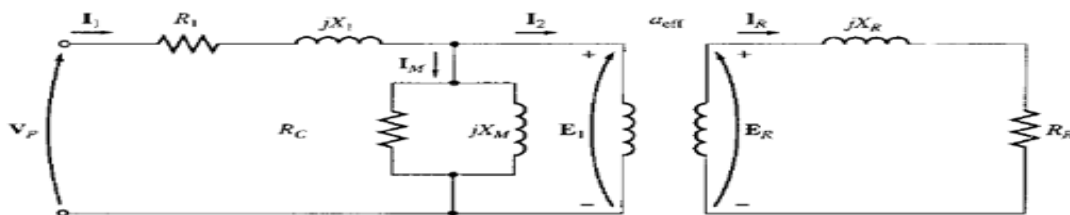


Fig. 1.10 modelo de transformador de un motor de inducción con el rotor y estator conectado por un transformador ideal de relación de vueltas a_{eff} .

Y autoinductancia en los devanados primarios (del estator), las cuales deben ser



representadas en el circuito equivalente de la máquina. La resistencia del estator se llamará R_j y la reactancia de dispersión será llamada X_r . Estas dos componentes aparecen justo a la entrada en el modelo de la máquina.

Así mismo, como cualquier transformador con núcleo de hierro, el flujo en la máquina está relacionado con la integral del voltaje aplicado E_1 . La curva de la fuerza magnetomotriz contra el flujo (curva de magnetización) para esta máquina es comparada a la curva similar para un transformador de potencia, en la fig.1.11. Nótese que la pendiente de la curva fuerza magnetomotriz-flujo del motor de inducción es mucho menos pronunciada que la curva de un buen transformador. Esto se debe a la existencia de un entrehierro en el motor de inducción, el cual aumenta grandemente la reactancia del camino del flujo y reduce, por tanto, el acoplamiento entre los devanados primario y secundario. Una mayor reluctancia ocasionada por el entrehierro significa que se requiere más alta corriente de magnetización para obtener un nivel de flujo dado. Entonces, la reactancia de magnetización X_M en el circuito equivalente tendrá mucho menor valor (o la susceptancia B_M tendrá mucho mayor valor) que en un transformador normal.

El voltaje primario interno del estator E_1 está acoplado al secundario E_R por un transformador ideal con relación efectiva de vueltas a_{eff} .

La relación efectiva de vueltas a_{eff} es fácil de determinar en un motor de rotor devanado es básicamente la relación entre los conductores por fase del estator y los conductores por fase del rotor, modificada por las diferencias dadas por los factores de paso y de distribución. En el caso de un motor de rotor de jaula de ardilla, es un tanto difícil ver con claridad a_{eff} debido a que no hay devanados distintos en este rotor. En todo caso, hay una relación efectiva de vueltas para el motor.

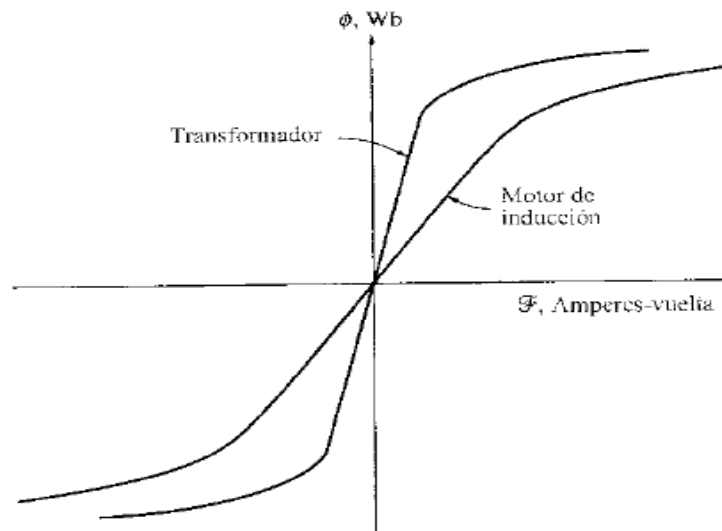


Fig. 1.11 Curva de magnetización de un motor de inducción comparada con la de un transformador.

El voltaje E_R producido en el rotor ocasiona a su vez un flujo de corriente en el circuito rotor cortocircuitado (o secundario) de la máquina.



Las impedancias primarias y la corriente de magnetización del motor de inducción son muy similares a las componentes correspondientes en el circuito equivalente del transformador. Un circuito equivalente del motor de inducción difiere de un circuito equivalente del transformador en los efectos de variación de la frecuencia del rotor sobre el voltaje del rotor E_R y en las impedancias del rotor R_R y jX_R .

Circuito modelo del rotor

En un motor de inducción, cuando se aplica voltaje a las bobinas del estator, se induce un voltaje en los devanados del rotor de la máquina. En general, *cuanto mayor sea el movimiento relativo entre los campos magnéticos del rotor y del estator, mayor será el voltaje resultante en el rotor y la frecuencia del rotor*. El mayor movimiento relativo ocurre cuando el rotor se encuentra estacionario, condición llamada de *rotor detenido* o *rotor bloqueado*, de modo que en esta condición se inducen el máximo voltaje y la máxima frecuencia del rotor. El mínimo voltaje (0 V) y la mínima frecuencia (0 Hz) ocurren cuando el motor se mueve con la misma velocidad que el campo magnético del estator, caso en que no hay movimiento relativo. La magnitud y frecuencia del voltaje inducido en el rotor a cualquier velocidad entre estos extremos es *directamente proporcional al deslizamiento del rotor*. Entonces, si la magnitud del voltaje inducido del rotor en condiciones de rotor bloqueado se llama E_{R0} , la magnitud del voltaje inducido para cualquier deslizamiento estará dada por la ecuación

$$E_R = sE_{R0}$$

Y la frecuencia del voltaje inducido para cualquier valor de deslizamiento estará dada por la ecuación

$$f_r = sf_e$$

Este voltaje es inducido en un rotor que contiene tanto resistencia como reactancia. La resistencia del rotor R_R es constante (excepto por el efecto pelicular o superficial), independientemente del deslizamiento, mientras que la reactancia del rotor se afecta de manera más complicada por el deslizamiento.

La reactancia de un rotor de motor de inducción depende de la inductancia del rotor y de la frecuencia del voltaje y la corriente del rotor. Si la inductancia del rotor es L_R , la reactancia del rotor está dada por

$$X_r = \omega_r = 2\pi f_r L_r$$

$f_r = sf_e$ Tal que

$$\begin{aligned} X_r &= 2\pi s f_e L_e \\ &= s(2\pi f_e L_e) \\ &= sX_{R0} \end{aligned}$$

Donde X_R es la reactancia del rotor en estado bloqueado.

El circuito equivalente resultante del rotor se muestra en la fig.1.12. El flujo de corriente en el rotor se puede encontrar como

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R}$$



$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jsX_{R0}}$$

$$I_R = \frac{E_R}{R_R ls + jX_{R0}}$$

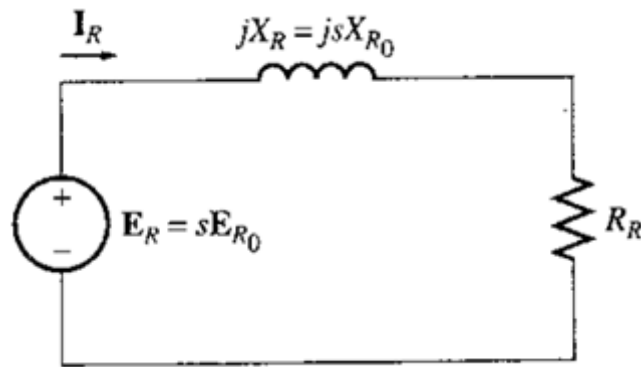


Fig. 1.12 circuito modelo del rotor de un motor de induccion.

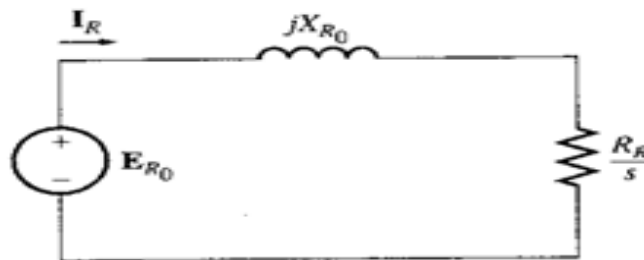


Fig.1.13 circuito modelo del rotor con todos los efectos de frecuencia (deslizamiento), concentrados en la resistencia R_R .

Nótese, de la ecuación, que es posible tratar todos los efectos del rotor debidos a la variación de la velocidad rotórica como ocasionados por una *impedancia variable* alimentada con potencia desde una fuente de voltaje constante E_{r0} . La impedancia equivalente del rotor desde este punto de vista es

$$Z_{r,eq} = R_R ls + jX_{R0}$$

Y el circuito equivalente del rotor que utiliza esta convención se muestra en la fig.1.13. En el circuito equivalente de la fig.1.13, el voltaje del rotor es constante $E_{R0}V$ Y la impedancia del rotor $Z_{R,eq}$ contiene todos los efectos de la variación del deslizamiento del rotor. Un dibujo del flujo de corriente en el rotor, como se dedujo en las ecuaciones anteriores.

Nótese que para deslizamientos muy bajos, el termino resistivo $R_R ls \gg X_{R0}$ tal que predomina la resistencia del rotor y la corriente rotórica, varía *linealmente* con el deslizamiento. En deslizamientos altos, X_{R0} es mucho mayor que R_R/s , y la corriente del rotor se *aproxima al valor de estado estacionario* cuando el



deslizamiento es muy grande.

Circuito equivalente final

Para producir el circuito equivalente por fase final de un motor de inducción, es necesario referir al lado del estator la parte del modelo correspondiente al rotor. El circuito modelo del rotor que será referido al lado del estator se muestra en la fig.1.13, el cual tiene todos los efectos de la variación de velocidad concentrados en el término de impedancia.

En un transformador normal los voltajes, las corrientes y las impedancias del lado secundario del aparato pueden ser referidos al lado primario mediante la relación de vueltas del transformador:

$$V_P = V'_S = aV_S$$
$$I_P = I'_S = \frac{I_S}{a}$$

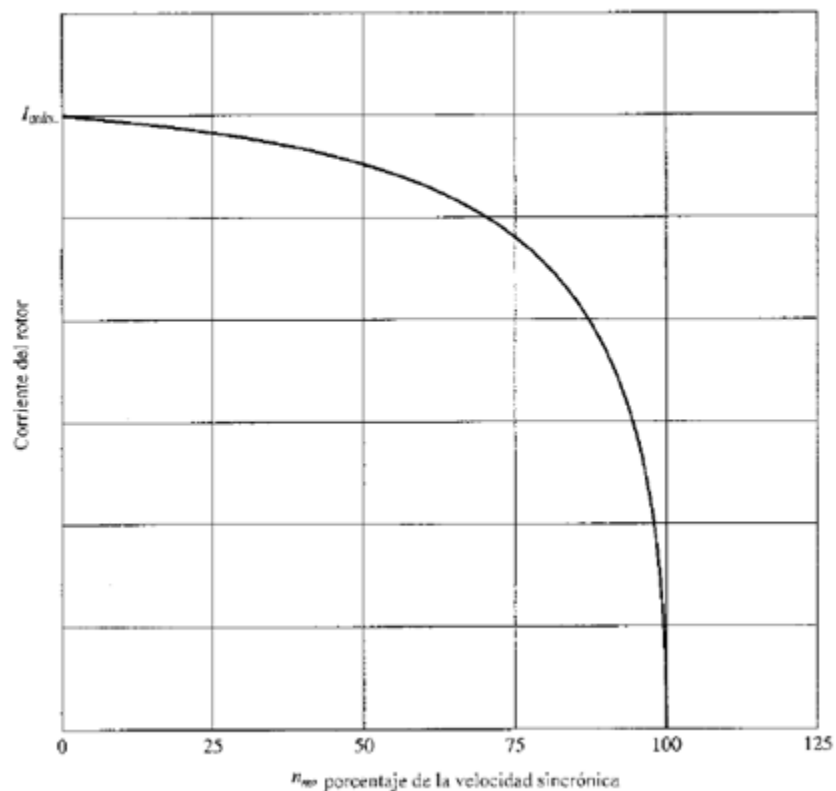


Fig. 1.14 corriente rotorica como función de la velocidad del rotor.



1.3.1 Introducción a los motores de inducción monofásicos.

Otro motor monofásico común es la versión monofásica del motor de inducción. Los motores monofásicos de inducción experimentan una grave desventaja. Puesto que sólo hay una fase en el devanado del estator, el campo magnético en un motor monofásico de inducción no rota. En su lugar, primero *pulsa* con gran intensidad, luego con menos intensidad, pero permanece siempre en la misma dirección. Puesto que no hay campo magnético rotacional en el estator, un motor monofásico de inducción *no tiene par de arranque*.

Este hecho es fácil de observar examinando el motor cuando su rotor está estacionario. El flujo del estator de la máquina aumenta primero y decrece luego, pero siempre apunta en la misma dirección.

Puesto que el campo magnético del estator no rota, *no hay movimiento relativo* entre el campo del estator y las barras del rotor. Por tanto, no hay voltaje inducido debido al movimiento relativo en el rotor, no fluye corriente debida al movimiento relativo en el rotor ni hay par inducido. En realidad, se induce un voltaje en las barras del rotor por acción de transformador ($d\phi/dt$) y, puesto que las barras están cortocircuitadas, fluye corriente en el rotor. Sin embargo, este campo magnético está alineado con el campo magnético del estator y no produce par neto sobre el rotor,

$$\begin{aligned}\tau_{ind} &= KB_R \chi B_S \\ &= KB_R B_S \text{sen} \gamma \\ &= KB_R B_S \text{sen} 180 = 0\end{aligned}$$

Como el rotor está detenido, el motor parece un transformador con el devanado secundario cortocircuitado (véase figura 1.15)

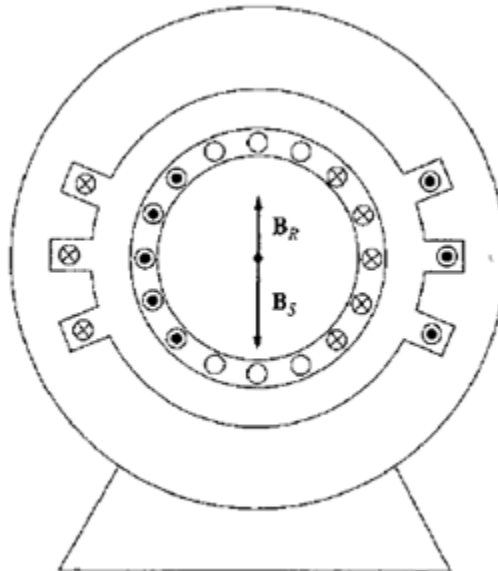


Fig. 1.15 motor monofásico de inducción en condiciones de arranque. El devanado del estator induce voltajes y corrientes opuestas en el circuito del rotor, que originan un campo magnético del rotor, alineado con el campo magnético del estator $\tau_{ind} = 0$.



El hecho de que los motores monofásicos de inducción no posean par intrínseco de arranque fue un impedimento grave para su desarrollo temprano. Al comienzo del desarrollo de los motores de inducción a finales de los años de 1880 y principios de la década de 1890, los primeros sistemas de potencia ac disponibles eran monofásicos de 133 Hz. Con los materiales y técnicas disponibles entonces, fue imposible construir un motor que funcionara bien. El motor de inducción sólo llegó a ser un producto comercial cuando se desarrollaron los sistemas de potencia trifásicos de 60 Hz a mediados de la década de 1890. Sin embargo, *una vez que el motor comienza a girar, se induce un par en él*. Existen dos teorías básicas que explican por qué se produce un par en el rotor una vez empieza a girar. Una es la llamada *teoría de doble campo giratorio* de los motores de inducción monofásicos, la otra es la llamada *teoría de campo cruzado* de los motores de inducción monofásicos. Cada una de ellas se describirá a continuación.

Teoría de doble campo giratorio de los motores de inducción monofásicos

La teoría de doble campo giratorio de los motores de inducción monofásicos establece que un campo magnético estacionario pulsante se puede transformar en dos campos magnéticos *rotacionales* de igual magnitud pero de direcciones opuestas. El motor de inducción responde a cada uno de los campos magnéticos por separado y el par neto en la máquina será la suma de los pares debidos a cada uno de los dos campos magnéticos.

La fig.1.16 muestra cómo un campo magnético estacionario pulsante puede transformarse en dos campos magnéticos rotacionales iguales y opuestos. La densidad de flujo del campo magnético estacionario está dada por

$$\mathbf{B}_S(t) = (B_{max} \cos \omega t) \hat{\mathbf{j}}$$

Un campo magnético que rota en sentido de las manecillas del reloj puede expresarse como

$$\mathbf{B}_{CW}(t) = \left(\frac{1}{2} B_{max} \cos \omega t\right) \hat{\mathbf{i}} - \left(\frac{1}{2} B_{max} \sin \omega t\right) \hat{\mathbf{j}}$$

Y, un campo magnético que rota en sentido contrario a las manecillas del reloj puede expresarse como

$$\mathbf{B}_{CCW}(t) = \left(\frac{1}{2} B_{max} \cos \omega t\right) \hat{\mathbf{i}} + \left(\frac{1}{2} B_{max} \sin \omega t\right) \hat{\mathbf{j}}$$

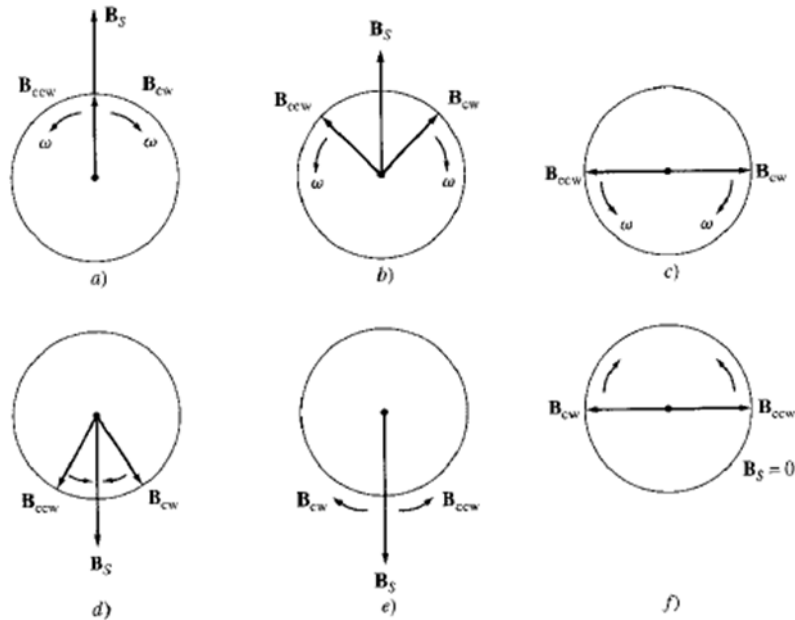


Fig. 1.16 transformación de un único un campo magnético pulsante en dos campos magnéticos de igual magnitud y direcciones opuestas. Nótese que el vector suma los 2 campos magnéticos permanece todo el tiempo en el plano vertical.

Nótese que la suma del campo magnético que gira en sentido de las manecillas del reloj con el que gira en sentido contrario a ellas es igual al campo magnético pulsante estacionario B_S :

$$B_S(t) = B_{CW}(t) + B_{CCW}(t)$$

La característica par-velocidad de un motor de inducción trifásico, resultado de su único campo magnético rotacional, se muestra en la fig.1.17a. Un motor de inducción monofásico responde a cada uno de los dos campos magnéticos presentes en él; en consecuencia, el par inducido neto en el motor es la *diferencia* entre las dos curvas par-velocidad. En la fig.1.17b se muestra este par neto. Nótese que a velocidad cero no hay par neto; por tanto, el motor no tiene par de arranque. La característica par-velocidad mostrada en la fig.1.17b no es una descripción muy exacta del par en un motor de inducción monofásico. Ésta se formó por superposición de dos características trifásicas e ignoró el hecho de que ambos campos magnéticos están presentes *simultáneamente* en el motor monofásico.

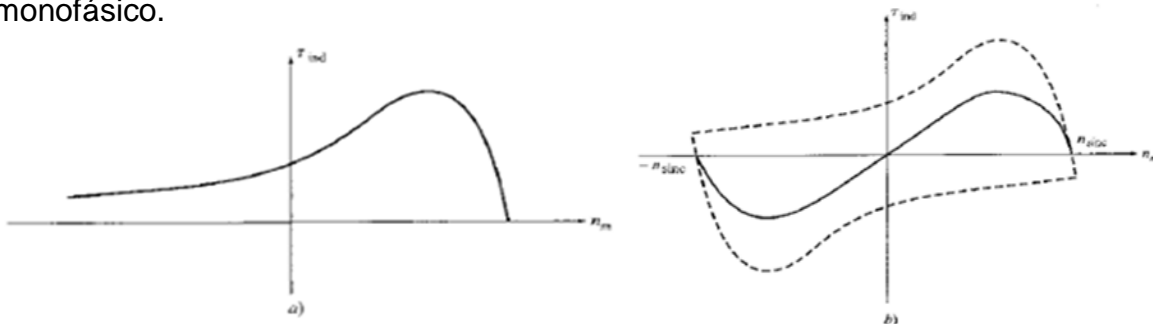


Fig. 1.17 a) característica par-velocidad de un motor trifásico de inducción. b) curvas características par-velocidad los dos campos magnéticos estatoricos iguales y que rotan en direcciones opuestas.



Si se aplica potencia a un motor trifásico mientras es forzado a girar en sentido contrario, sus corrientes rotóricas serán muy altas (véase fig.1.18a). Sin embargo, la reactancia del rotor es mucho mayor que su resistencia debido a que la frecuencia del rotor también es muy alta. Puesto que la reactancia del rotor es tan alta, la corriente del rotor atrasa el voltaje de éste en casi 90° produciendo un campo magnético que está aproximadamente a 180° del campo magnético del estator (véase fig.1.19). El par inducido en el motor es proporcional al seno del ángulo entre los dos campos; dado que el seno de un ángulo cercano a 180° es un número muy pequeño, el par del motor sería muy pequeño excepto porque las corrientes muy altas del rotor compensan parcialmente el efecto de los ángulos del campo magnético (véase fig. 1. 18b).

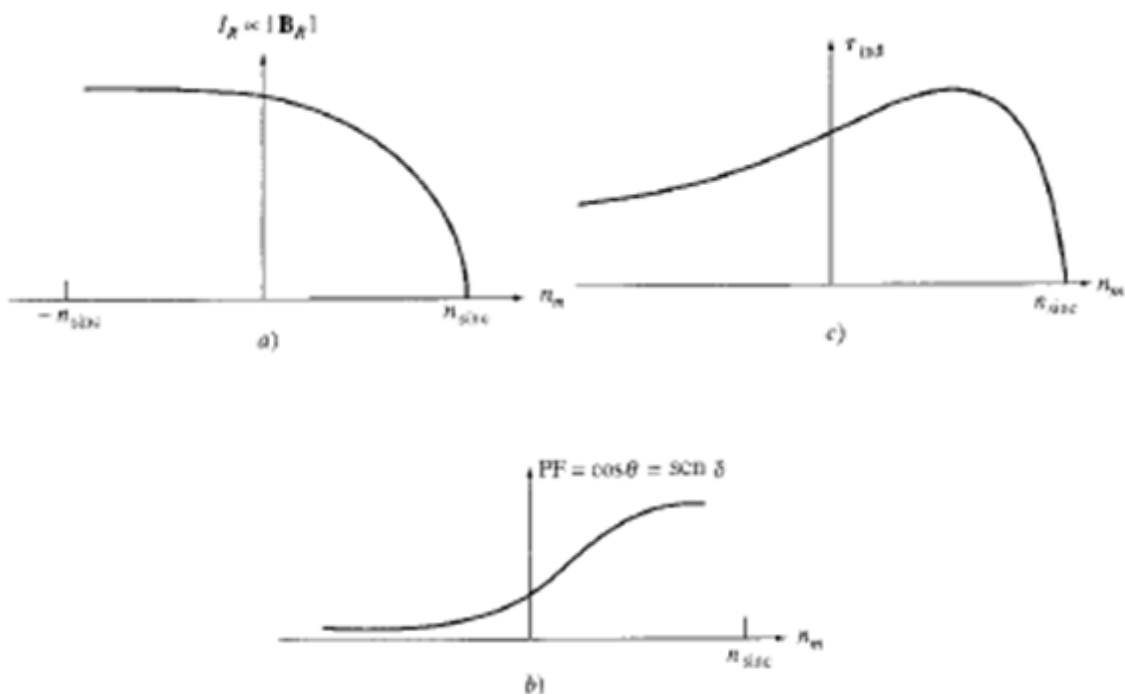


Fig.1.18 La característica par-velocidad de un motor trifásico de inducciones proporcional tanto a la intensidad del campo magnético del rotor, como al seno del ángulo entre los campos. Cuando el rotor se gira hacia atrás I_R e I_X son muy altas, pero el ángulo entre los campos es muy grande y ese ángulo limita al par del motor.

Por otra parte, tanto el campo magnético directo como el inverso están presentes en un motor monofásico y ambos son producidos por la *misma* corriente. Los dos campos, el directo y el inverso, están en serie entre sí y cada uno aporta en el motor una componente del voltaje total en el estator. Debido a que ambos campos magnéticos están presentes, el campo magnético rotacional directo (el cual tiene una alta resistencia efectiva de rotor R_2/s) limitará el flujo de corriente estatórica en el motor (la cual produce ambos campos, el directo y el inverso). Puesto que la corriente que suministra el campo magnético estatórico inverso está limitada a un pequeño valor y que el campo magnético inverso del rotor está a un ángulo muy grande con respecto



al campo magnético inverso del estator, el par debido a los campos inversos es *muy* pequeño cuando el motor opera cerca de la velocidad sincrónica. La fig.1.20 muestra una característica más exacta par-velocidad para el motor de inducción monofásico.

Además del par neto medio mostrado en la fig.1.20, se producen pulsaciones de par a dos veces la frecuencia estatórica. Estas pulsaciones de par son causadas cuando los campos magnéticos directo e inverso se entrecruzan, dos veces por ciclo. Aunque estas pulsaciones de par no producen par medio, aumentan la vibración y hacen que los motores monofásicos de inducción sean más ruidosos que los trifásicos del mismo tamaño. No hay forma de eliminar estas pulsaciones puesto que la potencia instantánea siempre llega en forma de pulsos en un circuito monofásico. Un diseñador debe prever esta vibración inherente al diseño mecánico de los motores monofásicos de inducción.

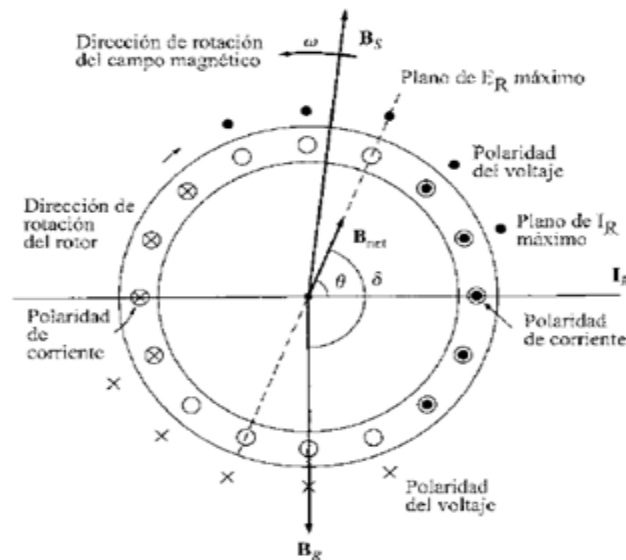


Fig. 1.19 Cuando el rotor del motor es forzado a girar hacia atrás, el ángulo entre B_R y B_S se aproxima a 180° .

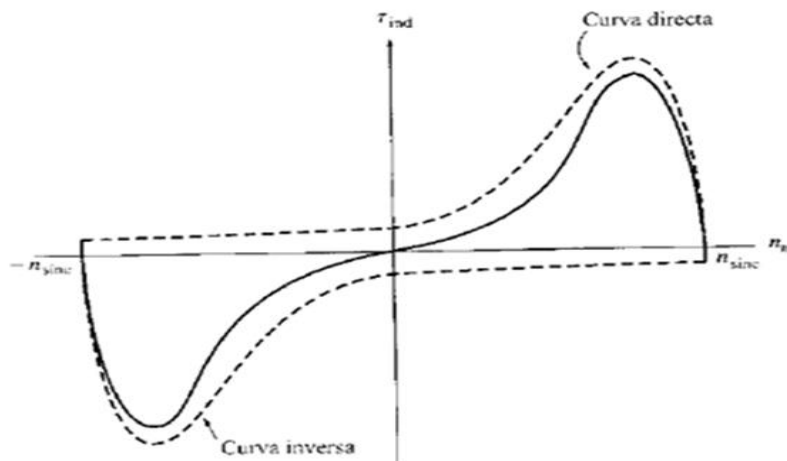


Fig. 1.20 característica par velocidad de un motor de inducción monofásico de inducción, teniendo en cuenta la limitación de corriente sobre el campo magnético rotacional inverso, causada por la presencia del campo magnético rotacional directo.



Teoría de campo cruzado en los motores monofásicos de inducción.

La teoría de campo cruzado en los motores monofásicos de inducción estudia el motor de inducción desde un punto de vista diferente. Esta teoría se ocupa de los voltajes y corrientes que el campo magnético estacionario del estator puede inducir en las barras del rotor cuando éste está en movimiento. Considérese un motor monofásico de inducción cuyo rotor se ha puesto en marcha por algún medio externo. En la fig.1.21a se muestra tal motor. En las barras del rotor se inducen voltajes cuyo valor pico ocurre en los devanados que pasan directamente bajo los devanados del estator. Estos voltajes rotóricos producen un flujo de corriente en el rotor pero, debido a la alta reactancia de éste, la corriente atrasa al voltaje en casi 90° . Puesto que el rotor gira cerca de la velocidad sincrónica, esos 90° de atraso en la corriente producen un desplazamiento *angular* de casi 90° entre el plano del voltaje pico del rotor y el plano de la corriente pico. En la fig. 1.21b se muestra el campo magnético resultante del rotor. El campo magnético del rotor es un tanto menor que el del estator debido a las pérdidas en el rotor, difieren cerca de 90° *tanto en espacio como en tiempo*. Si se suman en diferentes tiempos estos dos campos magnéticos, se observa que el campo magnético total en el motor está rotando en dirección contraria a las manecillas del reloj. Con un campo magnético rotacional presente en el motor de inducción, éste desarrollará un par neto en la dirección del movimiento y ese par mantendrá girando al motor.

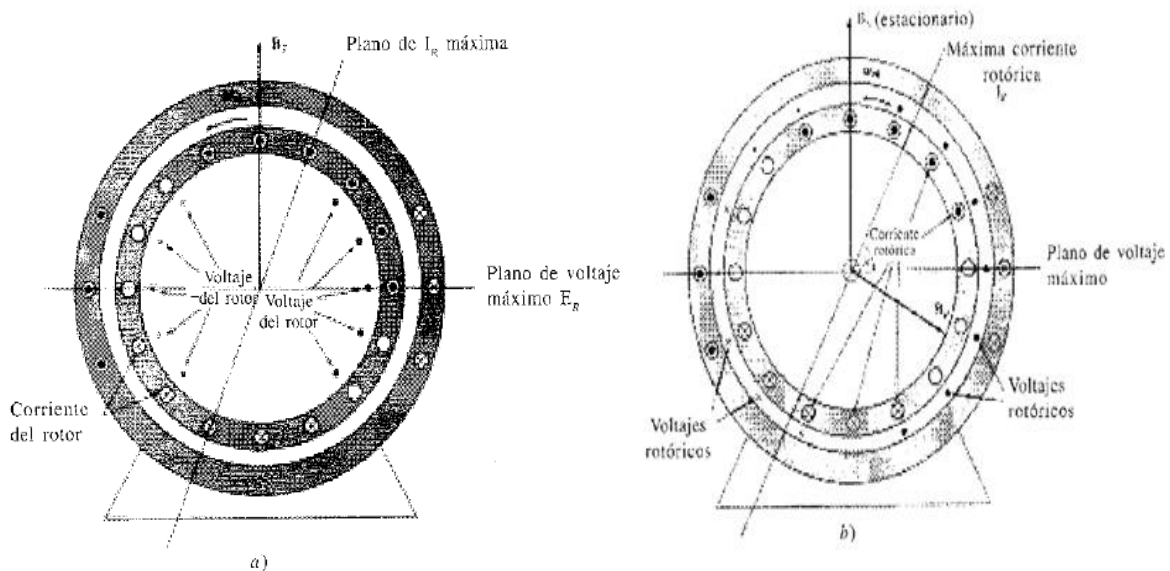


Fig. 1.21 a) Desarrollo de un par inducido en un motor de inducción desde el punto de vista del campo cruzado. Si el campo del estator es pulsante, inducirá voltajes en las barras del rotor como lo demuestran las marcas internas del rotor. Sin embargo la corriente del rotor está atrasada casi 90° del voltaje del rotor y si el rotor está girando, la corriente del rotor alcanza su valor pico cuando el ángulo sea diferente al ángulo de voltaje del rotor. b) Esta corriente rotórica atrasada produce un campo magnético en el rotor a un ángulo diferente del ángulo del campo magnético del estator.



1.4.1 Motores de inducción trifásicos.

El motor de inducción trifásico, también llamado motor asíncrono, es hoy día el motor eléctrico que más se utiliza en las aplicaciones industriales, sobre todo el motor con rotor de jaula de ardilla.

1.4.2 Principios de funcionamiento.

La sección del *motor de inducción trifásico*, se compone de un bastidor o estator fijo, un bobinado trifásico alimentado por una *red eléctrica trifásica* y un *rotor* giratorio. No hay ninguna conexión eléctrica entre el estator y el rotor. Las corrientes del rotor se inducen desde el estator a través del entrehierro. Tanto el estator como el rotor están fabricados de una lámina de núcleo altamente magnetizable que proporciona pérdidas por corrientes de Foucault e histéresis bajas.

Estator

El *bobinado del estator* está formado por tres bobinados individuales que se superponen y están decalados con un ángulo eléctrico de 120°. Cuando se conecta a la alimentación, la corriente de entrada primero magnetiza el estator. Esta *corriente de magnetización* genera un *campo rotativo* que gira con la *velocidad de sincronismo* n_s .

$$\text{Velocidad de sincronismo } n_s = 60 \frac{f}{p}$$

$$n_s = \text{velocidad de sincronismo/segundo}$$

$$f = \text{frecuencia } s^{-1}(\text{segundo})$$

$$p = \text{numero de pares de polos(numero de polos)}$$

Para el número de pares de polos más pequeño $2p = 2$ en un circuito de 50 Hz, la velocidad sincrónica más alta es $n_s = 3000/\text{min}^{-1}$. Las velocidades sincrónicas de un circuito de 50 Hz se indican en la Tabla 1.

Rotor

En los motores de inducción con rotor de jaula de ardilla, el rotor está formado por un bloque laminar de núcleo de rotor cilíndrico y ranurado provisto de barras de aluminio unidas por delante con anillas para formar una jaula cerrada.

El *rotor* de los motores de inducción trifásicos a veces se denomina *rotor*. Este nombre tiene su origen en la forma de ancla que tenían los rotores de los primeros dispositivos eléctricos. En un equipo eléctrico, el bobinado del rotor está inducido por el campo magnético, mientras que en los motores trifásicos, este papel corresponde a los rotores.

Pares de polos 2p	2	4	6	8	10	12	16	24	32	48
n_s en rpm	3000	1500	1000	750	600	500	375	250	188	125

Tabla 1 velocidades sincronas típicas de un circuito de 50 HZ. las velocidades sincronas son un 20% mas altas en un circuito de 60HZ.



Fig. 1.22 Motor trifásico de jaula de ardilla de última generación.

El motor de inducción *parado* actúa como un transformador cortocircuitado en el secundario. Por consiguiente, el *bobinado del estator* corresponde al *bobinado principal* y el *bobinado del rotor* (bobinado de jaula), al *bobinado secundario*.

Dado que está en cortocircuito, la corriente interna del rotor depende de la tensión inducida y de su resistencia. La interacción entre el *flujo magnético* y los *conductores de corriente del rotor* genera un *par de torsión* que se corresponde con la rotación del campo rotativo. Las barras de la jaula están dispuestas de forma excéntrica con respecto al eje de rotación para impedir fluctuaciones en el par de torsión (véase la fig.1.23). Esto se denomina "inclinación". Cuando está *en vacío*, el rotor casi alcanza la velocidad sincrónica del campo rotativo, ya que el par de torsión antagonista es reducido (ninguna pérdida sin carga). Si la rotación fuera la de sincronismo, la tensión ya no se induciría, la corriente dejaría de fluir y ya no habría par de torsión.

Durante el *funcionamiento*, la velocidad del rotor baja hasta la *velocidad de carga* n . La diferencia entre la velocidad sincrónica y la de carga se denomina *deslizamiento* s . Basado en este deslizamiento s , dependiente de la carga, la tensión inducida en el bobinado del rotor cambia y éste, a su vez, cambia la corriente del rotor y el par de torsión M . Al aumentar el deslizamiento, también lo hacen la corriente del rotor y el par de torsión. Dado que el motor de inducción trifásico actúa como un transformador, la corriente del rotor se transforma en la parte del estator (o secundario) y la corriente de alimentación del estator cambia esencialmente de la misma manera. La *potencia eléctrica* del estator generada por la corriente de alimentación se convierte, a través del *entrehierro*, en *potencia mecánica* en el rotor. Por ello, la corriente del estator consta de dos componentes, La *corriente de magnetización* y la *corriente de carga* en sí.

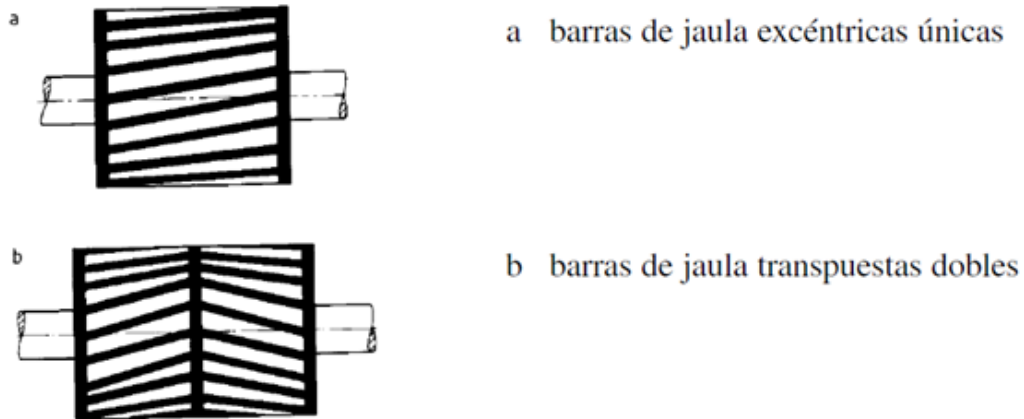


Fig. 1.23 Tipos de bobinado del motor jaula de ardilla

Deslizamiento

La diferencia entre la velocidad sincrónica n_s y la velocidad n de funcionamiento de régimen se denomina *deslizamiento* s y suele expresarse en porcentaje.

Dependiendo del tamaño de la máquina, durante el funcionamiento de régimen esta diferencia es aproximadamente del 10-3%. El deslizamiento es una de las características más importantes de una máquina de inducción.

$$\text{Deslizamiento } s = \frac{n_s * n}{n_s}$$

$$s = \text{deslizamiento}$$

$$n_s = \text{velocidad sincrónica}$$

$$n = \text{velocidad del rotor}$$

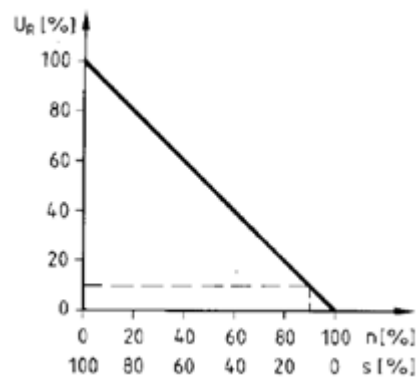


Fig. 1.24 la tensión rotorica U_R es proporcional al deslizamiento s . Una tensión del rotor del 10% corresponde a un deslizamiento del 10%.

La tensión rotórica inducida U_R , mostrada en la Fig. 1.24, es proporcional al deslizamiento s . En la posición de parada, la tensión alcanza su máximo con $n = 1$ y $s = 1$, lo que también intensifica al máximo el flujo de corriente. En las



aplicaciones reales, este hecho lo confirma la elevada corriente de arranque (a flujo de corriente de arranque). El par de torsión también alcanza su máximo durante el periodo de parada con una resistencia de rotor determinada. Este comportamiento puede modificarse variando el diseño. Sin embargo, la resistencia del rotor no suele utilizarse para este fin. La siguiente fórmula se aplica para la velocidad del rotor:

$$\begin{aligned} \text{Velocidad del rotor } n &= n_s * (1 * s) \\ n &= \text{velocidad del rotor} \\ n_s &= \text{velocidad sincrónica} \\ s &= \text{deslizamiento} \end{aligned}$$

Disipación

Dado que la velocidad n del rotor es inferior a la velocidad sincrónica n_s del campo rotativo por el valor del deslizamiento s , la potencia mecánica P_2 del rotor también es inferior a la potencia del campo rotativo P_D transmitida eléctricamente.

La diferencia P_{VR} se pierde en el rotor en forma de calor. En consecuencia, estas pérdidas en el bobinado dependen directamente del deslizamiento s . Desde el primer momento del proceso de arranque, toda la potencia inducida en el rotor se convierte en calor.

$$\text{Disipación en el rotor } P_{VR} = P_D * s = \text{pérdida óhmica } P_{CuR} \text{ en } W$$

La ecuación muestra que el peligro térmico es mayor para un rotor estacionario con $s = 1$, ya que toda la potencia de entrada eléctrica se convierte en disipación de calor en el motor. Debido a la elevada intensidad del arranque de los motores de inducción, el calor disipado es múltiplo de la potencia nominal del motor. Asimismo, los motores autoventilados convencionales no proporcionan una Refrigeración adecuada cuando se detienen.

Si analizamos todas las pérdidas de potencia P_V de un motor, como muestra la Figura1.25, encontramos las siguientes *pérdidas individuales*.

- P_{Fe} *Pérdidas en el núcleo del estator* \Rightarrow más o menos constante durante el funcionamiento
- P_{CuS} *Pérdida óhmica en el estator* \Rightarrow función cuadrada de la corriente
- P_{CuR} *Pérdida óhmica en el rotor* \Rightarrow función cuadrada de la corriente
- P_{Lu} *Pérdida por resistencia aerodinámica* \Rightarrow más o menos constante durante el funcionamiento
- P_{La} *Pérdidas por rozamiento mecánico* \Rightarrow más o menos constantes durante el funcionamiento
- P_{zus} *Pérdidas por dispersión* \Rightarrow más o menos constantes durante el funcionamiento

La *pérdida en el núcleo del estator* P_{Fe} se debe a las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas que dependen de la tensión y la frecuencia. Por ello, durante



el funcionamiento son más o menos constantes. En el rotor, las pérdidas son insignificantes debido a la baja frecuencia de la corriente del rotor durante el funcionamiento. Las *pérdidas óhmicas* se originan en el estator P_{CuS} y el rotor P_{CuR} . Ambas son una función cuadrada de la carga. Las *pérdidas por resistencia aerodinámica* P_{Lu} y *por rozamiento mecánico* P_{La} también son constantes debido a la velocidad de funcionamiento prácticamente constante. Las *pérdidas por dispersión* P_{zus} son originadas principalmente por las corrientes parásitas de los componentes metálicos de la máquina.

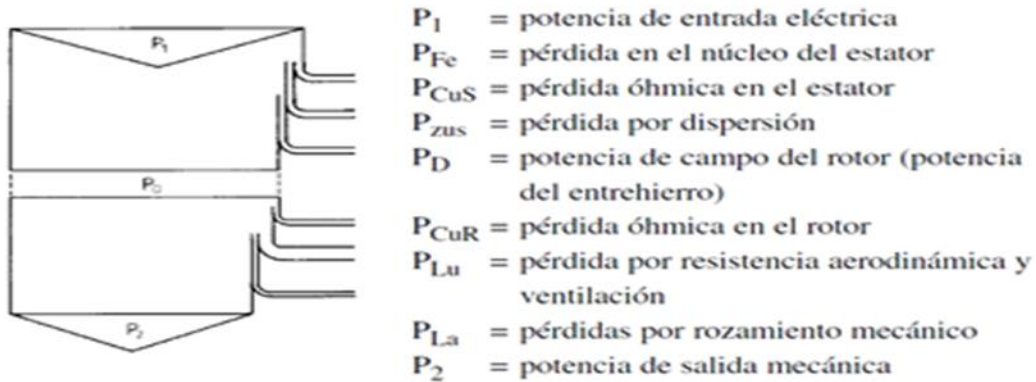


Fig. 1.25 potencia de salida y pérdidas en un motor de inducción trifásico.

1.4.3 Características del par de torsión.

Característica principal

La Fig.1.26 muestra, mediante los siguientes parámetros, las características de par de torsión propias de los motores de inducción con rotor de jaula de ardilla. El *par acelerador* abarca toda la característica de par, desde la parada hasta la velocidad máxima.

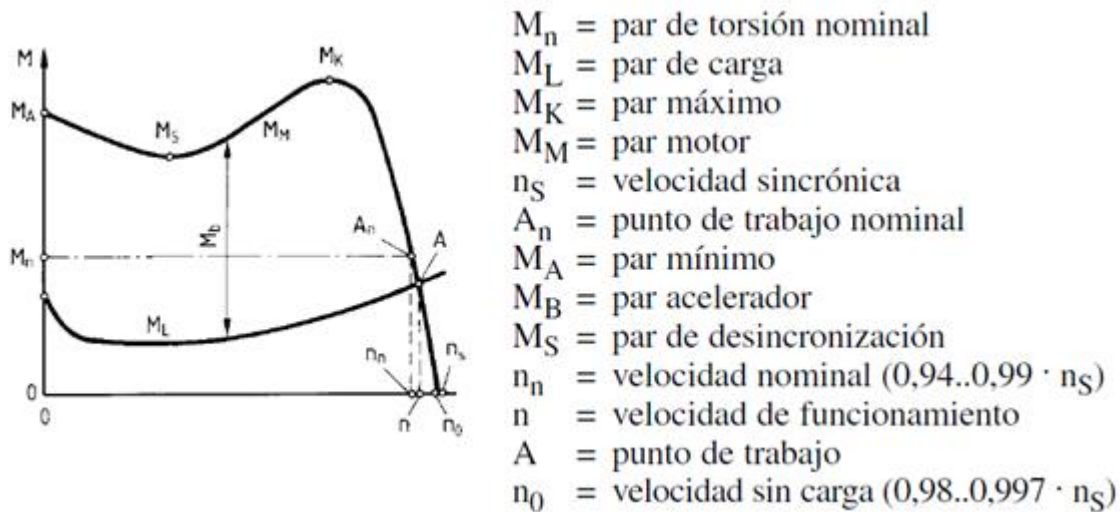


Fig. 1.26 característica del par del motor de inducción respecto a la velocidad.

MA Par inicial de arranque en la posición de parada; también llamado *par mínimo*.



Los valores proporcionados por los fabricantes de motores deberían estar comprendidos entre -15% y +25%.

Mn *Par de torsión de régimen* durante el funcionamiento de régimen con una potencia de régimen P_n y una velocidad de régimen n_n . Sin carga, el par es muy bajo y cubre la fricción interna. Cuando el motor se carga, su velocidad disminuye ligeramente por el valor del deslizamiento s y el par aumenta.

Un motor estándar en funcionamiento continuo debe poder proporcionar el par nominal sin exceder el límite de temperatura.

En algunos modos de funcionamiento (S2, S3 y S6), el par nominal también puede excederse hasta cierto punto a lo largo de todo el régimen de funcionamiento, siempre que el límite de temperatura no se sobrepase.

MK *Par máximo*. Éste es el *par máximo* que un motor puede proporcionar. Si la potencia aumenta por encima de la carga nominal P_n , el deslizamiento s continúa incrementándose, la velocidad n disminuye y el motor proporciona un par mayor. Esto puede aumentarse hasta el valor máximo MK (par máximo), momento en el que el motor se hace *inestable*, es decir, su velocidad disminuye de repente con este valor de deslizamiento (deslizamiento de interrupción) y la velocidad del motor tiende a 0.

Motores de inducción trifásicos

Según las normas, el par máximo debe ser $MK \geq 1,6 M_n$ y es necesario poder sobrecargar el motor al menos durante 15 segundos con este valor y la tensión y frecuencia nominal. Los datos de catálogo permiten una tolerancia de hasta un -10%. En la mayoría de los motores, el par máximo es considerablemente mayor y suele alcanzar valores de $MK = 2...3,5 M_n$. Por consiguiente, los motores de inducción son especialmente apropiados para las cargas intermitentes, siempre que el calor adicional pueda disiparse.

MS *Par de desincronización*; es el par mínimo producido durante la aceleración. En cualquier caso, debe ser mayor que el par de carga M_L a esa determinada velocidad, ya que, de lo contrario, el motor no puede acelerarse. Los valores mínimos del par de desincronización se indican en las normas correspondientes al funcionamiento a tensión nominal.

ML *Par de carga*, el *par antagonista* que representa a la carga durante la aceleración.

MM *Par motor*, también denominado *par acelerador*.

MB *Par acelerador*, como la diferencia entre el par motor M_M y el par de carga M_L .

Con un servicio continuo, un modo de funcionamiento S1 y una carga nominal P_n , un motor bien dimensionado gira a la velocidad nominal n_n y proporciona el par nominal M_n :

Según las normas, el par máximo debe ser $MK \geq 1,6 M_n$ y es necesario poder sobrecargar el motor al menos durante 15 segundos con este valor y la tensión y frecuencia nominal. Los datos de catálogo permiten una tolerancia de hasta un -10%. En la mayoría de los motores, el par máximo es

Considerablemente mayor y suele alcanzar valores de $MK = 2...3,5 M_n$. Por consiguiente, los motores de inducción son especialmente apropiados para las



cargas intermitentes, siempre que el calor adicional pueda disiparse.

MS *Par de desincronización*; es el par mínimo producido durante la aceleración. En cualquier caso, debe ser mayor que el par de carga M_L a esa determinada velocidad, ya que, de lo contrario, el motor no puede acelerarse. Los valores mínimos del par de desincronización se indican en las normas correspondientes al funcionamiento a tensión nominal.

ML *Par de carga*, el *par antagonista* que representa a la carga durante la aceleración.

MM *Par motor*, también denominado *par acelerador*.

MB *Par acelerador*, como la diferencia entre el par motor M_M y el par de carga M_L . Con un servicio continuo, un modo de funcionamiento S1 y una carga nominal P_n , un motor bien dimensionado gira a la velocidad nominal n_n y proporciona el par nominal M_n :

$$\text{Par nominal } M_n = 9555 * \frac{P_n}{n_n}$$

M_n = par nominal en Nm

P_n = potencia nominal en KW

n_n = velocidad nominal/minuto

Sin embargo, el par M también puede calcularse con los datos eléctricos del motor:

$$\text{Par de régimen } M_n = \frac{\sqrt{3} * U * I * \cos \varphi * \eta * 9.55}{n}$$

U = tensión en V

I = intensidad en A

$\cos \varphi$ = factor de potencia

η = rendimiento

n = velocidad

Durante el arranque, el par mínimo M_A debe ser mayor que el par mínimo de la carga y, durante la fase de aceleración completa, el par motor M_M debe permanecer por encima del par de carga M_L .

En la intersección de las dos líneas de par (punto de funcionamiento A), el motor funciona con velocidad constante n . En caso de sobrecarga, el punto de trabajo A aumenta por encima del punto de trabajo nominal A_n . Esto sólo se permite durante un periodo corto de tiempo para evitar el sobrecalentamiento del motor.

El punto de trabajo A tampoco debe ser demasiado bajo, por lo que no debería elegirse un motor sobredimensionado. Si está por debajo del 50% de la carga nominal, el rendimiento η y el factor de potencia $\cos \varphi$ disminuyen enormemente y los motores dejan de funcionar de forma económica. Un motor más grande también tiene una intensidad de arranque I_A mayor, ya que esta corriente es independiente del par de carga. Los motores de mayor tamaño sólo reducirían el tiempo de aceleración.



1.4.4 Diseño del motor.

En los motores de inducción trifásicos, las características del par pueden adaptarse en gran medida a la aplicación. En este caso, las propiedades importantes son una *intensidad de arranque baja* I_A y un *par de arranque alto* M_A . La característica de par y el tamaño de la intensidad de arranque vienen determinados principalmente por el *tipo de jaula del rotor* y la *forma de la ranura del rotor*, como puede verse en la Fig.1.27.

Es posible conseguir un par mínimo elevado M_A y una intensidad de arranque baja I_A mediante una resistencia óhmica de rotor relativamente alta en el par de arranque. Básicamente, durante el arranque se origina un "efecto de desplazamiento de corriente" (efecto pelicular) más o menos elevado; esto se aplica a todos los tipos de diseños de rotor. Se distinguen los siguientes diseños:

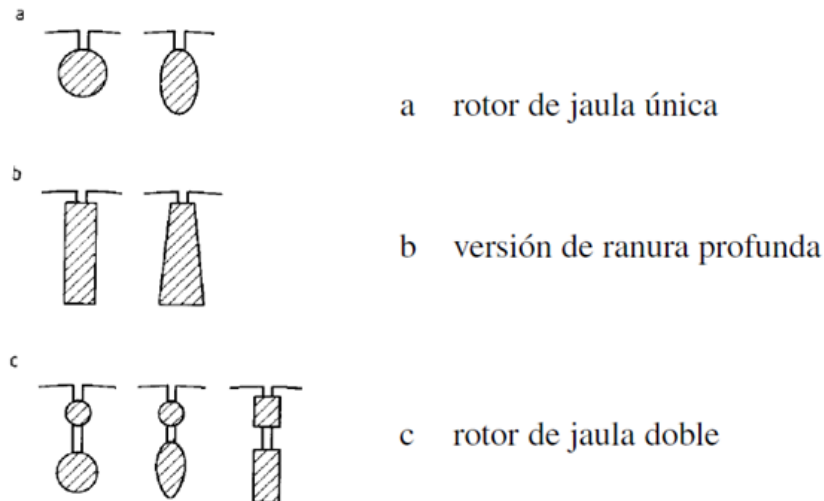


Fig. 1.27 Formas de ranuras para rotores jaula de ardilla.

- *Rotores de jaula de ardilla normales con ranura única* y conductores circulares, rectangulares o trapezoidales, hechos normalmente de aluminio y provistos de un par de arranque relativamente elevado ($1,8...2,5 \times M_n$) y una corriente de arranque alta ($5...10 \times I_n$).
- *Rotores de desplazamiento de corriente*, también llamados *rotors de barra profunda*. Si las barras de la jaula son altas y estrechas, durante la puesta en marcha se produce un *desplazamiento de corriente*, dado que en ese momento la frecuencia del rotor es alta. La corriente fluye por la parte exterior o "piel" del rotor. Este efecto reduce la sección transversal eficaz del conductor y, por consiguiente, aumenta la resistencia óhmica. El resultado es un par de arranque M_A bueno y una intensidad de arranque I_A baja favorable. Durante el funcionamiento, el desplazamiento de corriente deja de tener efecto, ya que en ese momento la frecuencia del rotor es muy baja y las corrientes y los pares del motor son normales.
- *Rotors de jaula de ardilla doble*, cuya barra está dividida en dos barras individuales que suelen estar eléctricamente aisladas la una de la otra. La *jaula externa* tiene una *resistencia óhmica alta* y la *interna*, una *resistencia*



óhmica baja. Esto se consigue utilizando un material (Cu, Al, Ms) y un tamaño de sección transversal de conductor apropiado. El efecto es incluso mayor que en un rotor de desplazamiento de corriente. Durante el arranque, la corriente fluye esencialmente sólo por la parte exterior de la jaula, lo cual reduce la corriente de arranque I_A e incrementa relativamente el par de arranque M_A .

Durante el funcionamiento, la corriente se distribuye entre las dos jaulas de acuerdo a sus resistencias óhmicas.

- *Rotores de jaula de ardilla de alta resistencia*, también llamados rotores de deslizamiento, con forma de ranura como la de un rotor de jaula de ardilla normal, pero con conductores de latón o de aleación de aluminio de alta resistencia en lugar de conductores de Al o Cu. Esto hace que la resistencia óhmica aumente. Este rotor, comparado con el de desplazamiento de corriente, permanece constante a lo largo de todo el régimen de velocidad y, durante su funcionamiento, produce un deslizamiento elevado con una característica de velocidad *flexible* y un par de arranque máximo poco pronunciado.

El par de arranque M_A es alto respecto a la resistencia del rotor y la intensidad de arranque I_A disminuye. Dado que, durante el funcionamiento, la resistencia óhmica es alta, las pérdidas son relativamente grandes, por lo que las prestaciones son poco económicas. En consecuencia, estos rotores se utilizan poco hoy en día, sobre todo desde que las características deseadas también pueden conseguirse con dispositivos electrónicos de bajas pérdidas, como los variadores y los arrancadores suaves.

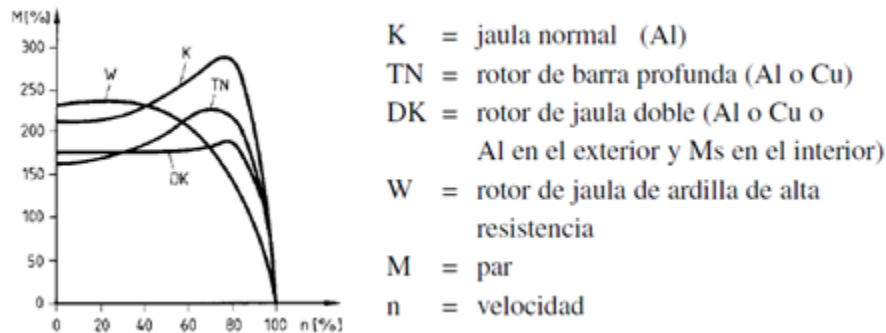


Fig. 1.28 Característica de par principal de varios tipos de jaulas de ardilla.

1.4.5 Características de funcionamiento.

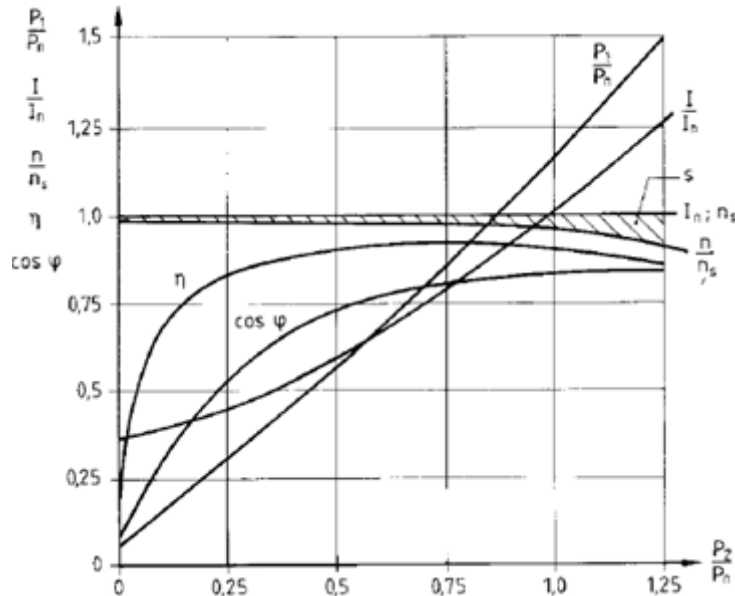
Las características de funcionamiento son una presentación gráfica del comportamiento de:

- La velocidad
- El factor de potencia
- El rendimiento
- La corriente
- La potencia
- El deslizamiento en función de la carga.

La Fig.1.29 muestra las características de funcionamiento de un motor de



inducción típico.



n = velocidad	n_s = velocidad sincrónica
P_1 = potencia de entrada	P_2 = potencia de salida
η = rendimiento	$\cos\phi$ = factor de potencia
I = corriente de entrada	I_n = intensidad nominal
s = deslizamiento	P_n = potencia nominal

Fig. 1.29 Características de funcionamiento de un motor de inducción en función de la carga.

n La *velocidad* n sólo disminuye ligeramente conforme aumenta la carga. Por consiguiente, los motores de jaula de ardilla estándar tienen unas *características de velocidad "rígidas"*.

s El *deslizamiento* s aumenta más o menos proporcionalmente con el incremento de la carga.

cosφ El *factor de potencia* $\cos\phi$ depende en gran medida de la carga y normalmente alcanza su máximo durante la sobrecarga. En el régimen de carga parcial, es relativamente desfavorable, ya que, incluso con cargas parciales, la magnetización es prácticamente constante.

η El *rendimiento* η muestra una característica *relativamente plana* y es prácticamente constante por encima de la media-carga. Suele alcanzar su máximo cuando está por debajo de la potencia de régimen P_n .

I La *intensidad* I aumenta *proporcionalmente* comenzando más o menos a media-carga. Por debajo de la media-carga, la corriente disminuye sólo ligeramente hasta convertirse en la corriente de carga nula I_0 (magnetización constante).



P La *potencia* P_1 aumenta más o menos en proporción con el inicio de carga comenzando en la potencia de carga nula. En el régimen de sobrecarga, la potencia aumenta algo más deprisa, ya que las pérdidas también se incrementan con más rapidez.

Dado que el rendimiento η y el factor de potencia $\cos\phi$ pueden tener un efecto importante sobre la eficacia económica de un motor, es muy importante saber cuáles son los valores de la carga parcial. Ambos valores determinan el rendimiento económico del funcionamiento. En el régimen de carga parcial, los dos valores disminuyen. Además, el factor de potencia $\cos\phi$ de los motores de velocidad baja es inferior al de los motores de velocidad elevada. Por consiguiente, los motores de velocidad alta y dimensionamiento preciso no sólo resultan más baratos al comprarlos, sino también al utilizarlos.



CAPITULO 2 ARRANQUE DE MOTORES ELECTRICOS.

2.1.1 Definición de conceptos básicos.

Corriente de cortocircuito: Sobreintensidad resultante de un cortocircuito debido a un defecto o a una incorrecta conexión en un circuito eléctrico.

La duración del cortocircuito es el tiempo en segundos o ciclos durante el cual, la corriente de cortocircuito circula por el sistema. El fuerte incremento de calor generado por tal magnitud de corriente, puede destruir o envejecer los aislantes del sistema eléctrico, por lo tanto, es de vital importancia reducir este tiempo al mínimo mediante el uso de las protecciones adecuadas. Los resultados obtenidos del cálculo de cortocircuito son:

- La corriente en los diferentes componentes del sistema.
- Las tensiones después de la falla en todas las barras del sistema eléctrico.

En el cálculo de cortocircuito es conveniente efectuar las siguientes aproximaciones:

- El generador se modela por una fuente de tensión de valor 1.0 en p.u, en serie con su impedancia.
- Todos los cálculos se realizan en por unidad.
- Las cargas se representan por su impedancia equivalente, independiente de la tensión.
- El sistema eléctrico se analiza como si estuviera en régimen estable

Corriente de sobrecarga de un circuito: Sobreintensidad que se produce en un circuito, en ausencia de un fallo eléctrico.

Corriente de arranque:

Todos los motores eléctricos para operar consumen un excedente de corriente, mayor que su corriente nominal, que es aproximadamente de dos a ocho veces superior.

2.1.2 Arranque de motores sincrónicos.

Para entenderla naturaleza del problema del arranque, es necesario remitirse a la figura 2.2. Esta figura muestra un motor sincrónico de 60 Hz en el momento en que se aplica potencia a sus devanados. El rotor del motor está estacionario y, por tanto el campo magnético B_R es estacionario. El campo magnético del estator B_S comienza a girar dentro del motor a velocidad sincrónica.

La figura 2.2a muestra la máquina en el tiempo $t = 0$ s, cuando B_R y B_S están exactamente alineadas. De la ecuación de par inducido

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_S$$

El par inducido sobre el eje del rotor es cero. La figura 2.2b muestra la situación en $t = 1/240$ s. En tan corto tiempo el rotor casi no se ha movido, pero el campo magnético del estator apunta ahora hacia la izquierda. De la ecuación de par inducido, el par sobre el eje del rotor se ejerce ahora *en sentido contrario a las*



manecillas del reloj. La figura 2.2e muestra la situación en tiempo $t = 1/120$ s. En este punto, B_R y B_S . Apuntan en direcciones opuestas y el par inducido τ_{ind} de nuevo es igual a cero. En $t = 3/240$ s, el campo magnético del estator apunta hacia la derecha, y el par resultante está en *sentido de las manecillas del reloj*.

Finalmente, en $t = 1/60$ s, el campo magnético del estator se alinea de nuevo con el campo magnético del rotor y el par inducido $\tau_{ind} = 0$. Durante un ciclo eléctrico, el par se ejerció primero en sentido contrario a las manecillas del reloj y luego en sentido de ellas, y el par promedio en el ciclo completo fue cero. Lo que ocurre al motor es que vibra con fuerza en cada ciclo eléctrico y al final se sobrecalienta.

Tal método de arranque del motor sincrónico no es muy satisfactorio: los directores tienden a fruncir el ceño ante los empleados que queman un equipo costoso. Entonces, ¿cómo se puede arrancar un motor sincrónico?

1. Existen tres métodos básicos para el arranque seguro de un motor sincrónico. *Reducir la velocidad del campo magnético del estator* a un valor suficientemente bajo para que el rotor pueda acelerar y se enlace con él durante medio ciclo de rotación del campo magnético. Esto se puede llevar a cabo reduciendo la frecuencia de la potencia eléctrica aplicada.

2. *Utilizar un motor primario externo* para acelerar al motor sincrónico hasta la velocidad de sincronismo, pasar por el proceso de entrada en sincronismo y convertir la máquina al instante en un generador. Entonces, apagando o desconectando el motor primario, la máquina sincrónica se transformará en un motor.

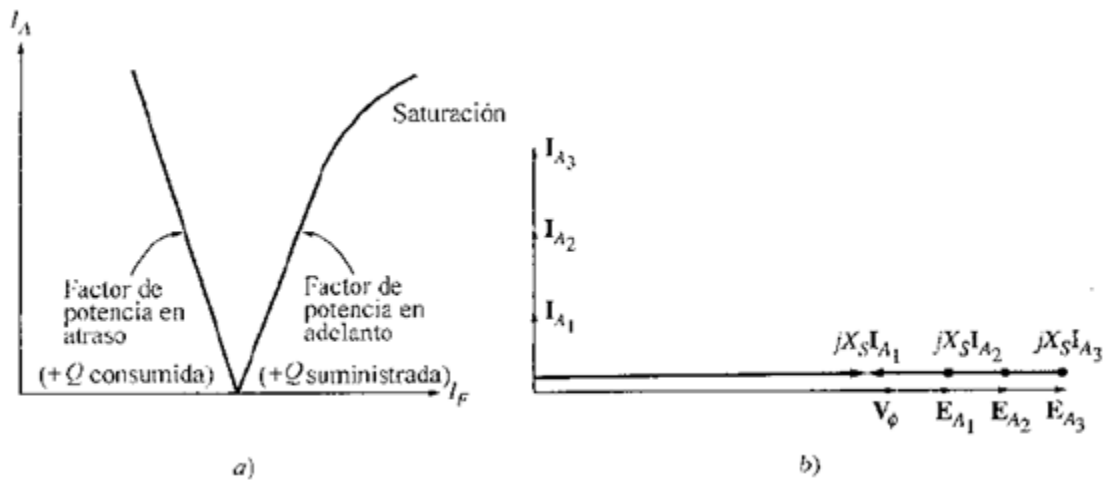


Fig. 2.1 a) Curva en V de un capacitor sincrónico. b) Diagrama fasorial correspondiente de la máquina.

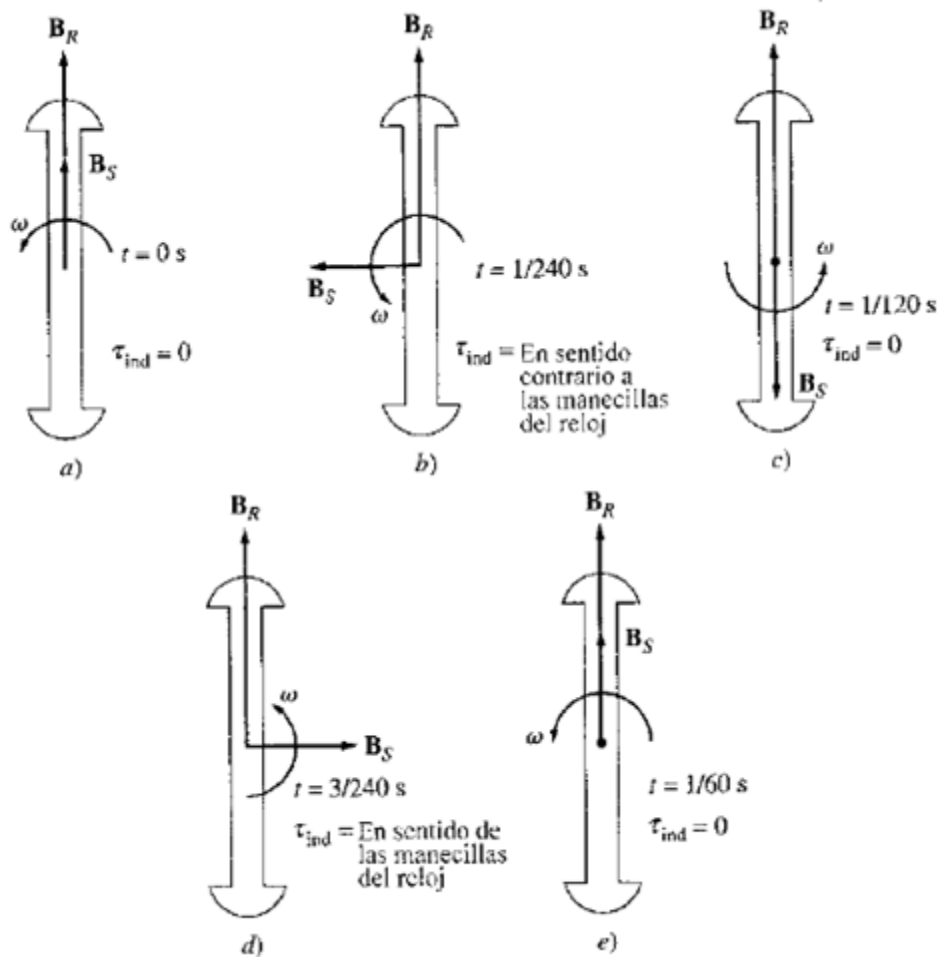


Fig. 2.2 problemas de arranque en un motor sincrónico: el par alterna con rapidez en magnitud y dirección de modo que el par neto de arranque es cero.

3. Utiliza devanados de amortiguación. La función de los devanados de amortiguación y su utilización en el motor se explicarán más adelante. Cada uno de estos métodos de arranque del motor sincrónico se describe a continuación.

Arranque del motor reduciendo la frecuencia eléctrica

Si el campo magnético del estator de un motor sincrónico rota a una velocidad suficientemente baja, no habrá dificultad para que el rotor acelere y se enlace con el campo magnético del estator. La velocidad de los campos magnéticos estatóricos se puede aumentar entonces hasta la velocidad de operación, incrementando gradualmente f_e hasta su valor normal de 50 ó 60 Hz.

Este método de arranque de los motores sincrónicos tiene gran sentido pero también tiene un problema grave: ¿de dónde se obtiene la frecuencia eléctrica variable? Los sistemas normales de potencia se regulan cuidadosamente a 50 ó 60 Hz por lo que, hasta hace poco, cualquier fuente de voltaje de frecuencia variable debía provenir de un generador específico. Tal situación no era práctica, excepto en algunas.



Circunstancias excepcionales.

Hoy día las cosas son diferentes. Los rectificadores-inversores y los cicloconvertidores, que pueden utilizarse para convertir una entrada de frecuencia constante a cualquier frecuencia de salida deseada. El desarrollo de tales accionamientos de estado sólido y frecuencia variable modernos posibilita el control continuo de la frecuencia eléctrica aplicada al motor en todo el rango desde una fracción de Hz hasta la frecuencia nominal más elevada. Si tal unidad controladora de frecuencia variable se incluye en un circuito motor-control para controlar la velocidad, entonces es muy fácil poner en marcha los motores sincrónicos: simplemente se ajusta la frecuencia a un valor muy bajo para el arranque y luego se eleva hasta la frecuencia de operación deseada para el funcionamiento normal.

Cuando se opera un motor sincrónico a una velocidad más baja que la nominal, su voltaje interno generado $E_A = K\phi\omega$ será menor que el normal. Si E_A se reduce en magnitud, debe reducirse el voltaje aplicado a los terminales del motor para mantener la corriente del estator en niveles seguros. En todo controlador de frecuencia variable o circuito arrancador de frecuencia variable, el voltaje debe variar casi linealmente con la frecuencia aplicada.

Arranque del motor mediante un motor primario externo

El segundo método para arrancar un motor sincrónico consiste en fijarle un motor externo de arranque y llevar la máquina sincrónica hasta su velocidad plena con ese motor. Entonces, la máquina sincrónica puede ser emparejada con su sistema de potencia como un generador, y el motor de arranque puede desacoplarse del eje de la máquina. Desconectado el motor de arranque, el eje de la máquina se desacelera, el campo magnético del rotor B_A , queda atrás de B_{net} y la máquina sincrónica comienza a actuar como motor. Una vez completo el emparejamiento, el motor sincrónico se puede cargar de manera normal.

Este procedimiento completo no es tan absurdo como parece pues muchos motores sincrónicos forman parte de conjuntos motor-generador y, en estos conjuntos, la otra máquina puede servir como motor de arranque de la máquina sincrónica. Además, el motor de arranque sólo necesita vencer la inercia de la máquina sincrónica en vacío, sin carga impuesta hasta que el motor se empareje con sistema de potencia. Puesto que únicamente debe ser vencida la inercia del motor, el motor de arranque puede tener una capacidad *mucho menor* que la del motor sincrónico que arranca.

Dado que la mayoría de los motores sincrónicos tienen sistemas de excitación sin escobillas montados en sus ejes, con frecuencia es posible utilizar esos excitadores como motores de arranque.



Para muchos motores sincrónicos de mediana y gran potencia, la única solución posible puede ser un motor externo de arranque o arrancador que utiliza el excitador ya que los sistemas de potencia a los que están unidos no están en capacidad de soportar las corrientes de arranque requeridas al utilizar la técnica de los devanados de amortiguación que se describe a continuación.

Arranque de motores utilizando devanados de amortiguación

Definitivamente la técnica más popular para el arranque de motores sincrónicos es emplear *devanados de amortiguación* o *devanados amortiguadores*. Estos devanados son barras especiales dispuestas en ranuras labradas en la cara del rotor del motor sincrónico y cortocircuitadas en cada extremo por un gran *anillo de cortocircuitado*. La figura 2.3 muestra una cara polar con un grupo de devanados de amortiguación.

Para entender la función de un grupo de devanados de amortiguación en un motor sincrónico, es preciso examinar el rotor de dos polos salientes estilizado de la figura 2.4. Este rotor muestra un devanado de amortiguación con las barras de cortocircuitado en los extremos de las dos caras polares conectadas por alambres (ésta no es del todo la forma normal de construcción de las máquinas, pero sirve a la perfección para ilustrar lo referente a estos devanados).

Suponga en principio que el *devanado principal del campo rotor está desconectado* y que al estator de la máquina se aplica un conjunto trifásico de voltajes. Cuando se aplica primero la potencia en $t = 0$ s, suponga que el campo magnético B_S es vertical como se muestra en la figura 2.5a. Puesto que el barrido de B_S va en dirección contraria a las manecillas del reloj, induce un voltaje en los devanados amortiguadores, dado por la ecuación:

$$E_{ind} = KB_W \times B_S$$

Donde V = velocidad de la barra *relativa al campo magnético*.

B - vector de densidad de flujo magnético.

l = longitud del conductor en el campo magnético.

En la parte superior del rotor, las barras están moviéndose hacia la derecha *con relación al campo magnético*, de modo que la dirección resultante del voltaje inducido apunta hacia fuera de la página. Así mismo, el voltaje inducido en las barras de la parte inferior apunta hacia dentro de la página. Estos voltajes producen un flujo de corriente hacia fuera de las barras de la parte superior y hacia dentro de ellas en la parte inferior, lo que origina un campo magnético B_W que apunta hacia la derecha. De la ecuación de par inducido

$$\tau_{ind} = KB_W \times B_S$$

El par resultante sobre las barras (y el rotor) se ejerce *en sentido contrario a las manecillas del reloj*.

La figura 2.5b muestra la situación en $t = 1/240$ s. Aquí, el campo magnético del estator ha rotado 90° mientras el rotor apenas si se ha movido (simplemente no puede acelerar en tan corto tiempo). En este punto, el voltaje inducido en los



devanados de amortiguación es cero puesto que v es paralelo a B . Sin voltaje inducido no hay corriente en los devanados, y el par inducido es cero.



Fig. 2.3 Polo del campo rotor de una maquina sincronica que muestra los devanados amortiguadores en la cara polar.

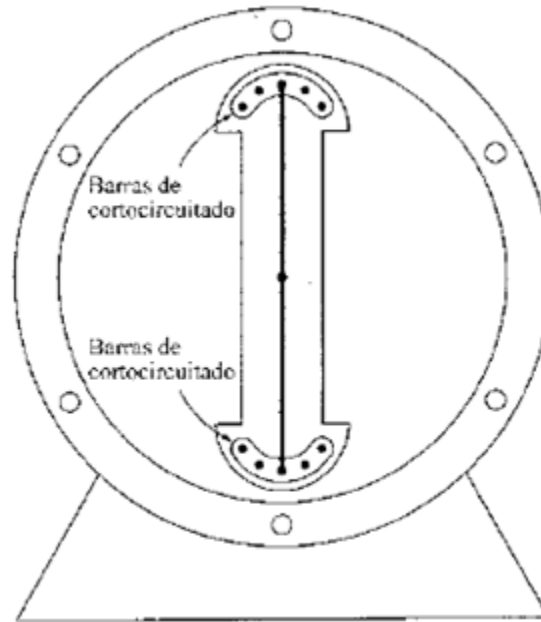


Fig. 2.4 diagrama simplificado de una maquina de dos polos salientes que muestra los devanados de amortiguacion.

La figura 2.5c muestra la situación en $t - 1/120$ s. Ahora, el campo magnético del estator ha rotado 180° y el rotor aún no se ha movido. El voltaje inducido en los devanados de amortiguación apunta hacia fuera de la página en las barras de la parte inferior y hacia dentro de la página, en las de la parte superior. El flujo de corriente resultante apunta hacia fuera de la página en las barras de la parte inferior y hacia dentro de la página, en las de la parte superior, y causa un campo magnético B_W que apunta hacia la izquierda. El par inducido resultante dado por:

$$\tau_{ind} = k B_W \times B_S$$



Se ejerce en *sentido opuesto a las manecillas del reloj*.

Finalmente, la figura 2.5d muestra la situación en $t = 3/240$ s. Aquí, como en $t = 1/240$ s, el par inducido es cero.

Nótese que a veces el par inducido se ejerce en sentido contrario a las manecillas del reloj y a veces es esencialmente cero, pero *siempre es unidireccional*. Puesto que hay un par neto en una sola dirección, el rotor del motor se acelerará (esto es totalmente diferente de poner en marcha un motor sincrónico con su corriente normal de campo puesto que, en ese caso, el par primero se ejerce en sentido de las manecillas del reloj y luego en sentido contrario, tendiendo en promedio a cero. En este caso, el par se ejerce *siempre* en la misma dirección, de modo que hay un par promedio diferente de cero).

Aunque el rotor del motor se acelerará, nunca puede alcanzar la velocidad sincrónica, lo cual es fácil de comprender. Suponga que un rotor está girando a velocidad sincrónica. Entonces, la velocidad del campo magnético del estator B_S es igual a la del rotor, y *no hay movimiento relativo* entre B_S y el rotor. Si no hay movimiento relativo, el voltaje inducido en los devanados será cero, el flujo de corriente resultante será cero y el campo magnético del devanado será cero. Por tanto, no se ejercerá ningún par sobre el rotor para mantenerlo girando. Aunque un rotor no puede acelerar hasta alcanzar la velocidad sincrónica, se aproximará bastante a ella. Se aproxima tanto a n_{sinc} puede generarse corriente normal de campo y el rotor girará al ritmo de los campos magnéticos del estator.

En una máquina real, los devanados de campo no están en circuito abierto durante el proceso de arranque. Si los devanados de campo estuvieran abiertos, se producirían muy altos voltajes en ellos durante el arranque. Si los devanados de campo están cortocircuitados durante el arranque, no se producen voltajes peligrosos y la corriente de campo inducida contribuye con par de arranque extra al motor.

En resumen, si una máquina tiene devanados de amortiguación, se puede arrancar con el siguiente procedimiento:

Desconecte los devanados de campo de su fuente de potencia de y cortocircuitélos.

Aplique un voltaje trifásico al estator del motor y deje acelerar el rotor hasta cerca de la velocidad sincrónica. El motor no deberá tener carga en su eje para que su velocidad llegue a ser lo más cercana posible a la velocidad sincrónica n_{sinc} .

Conecte el circuito dc de campo a la fuente de potencia. Luego, el motor se pondrá a paso a la velocidad sincrónica y las cargas podrán ser acopladas a su eje.

Efecto de los devanados de amortiguación sobre la estabilidad del motor

Si se adicionan devanados de amortiguación a una máquina sincrónica para el arranque, se obtiene una ventaja gratuita: aumento en la estabilidad de la máquina. El campo magnético del estator rota a velocidad constante n_{sinc} que cambia sólo cuando varía la frecuencia del sistema. Si el rotor gira a n_{sinc} , los devanados de amortiguación no tienen voltaje inducido alguno. Si el rotor gira *más lento que n_{sinc}* , habrá movimiento relativo entre los campos magnéticos del rotor y



del estator, y se inducirá un voltaje en los devanados. Este voltaje produce un flujo de corriente que, a su vez, produce un campo magnético. La interacción de los dos campos magnéticos produce un par que tiende a acelerar la máquina de nuevo. Si el rotor gira *más rápidamente* que el campo magnético del estator, se producirá un par que intenta frenar el rotor. En consecuencia, *el par producido por los devanados de amortiguación acelera las máquinas lentas y desacelera las rápidas.*

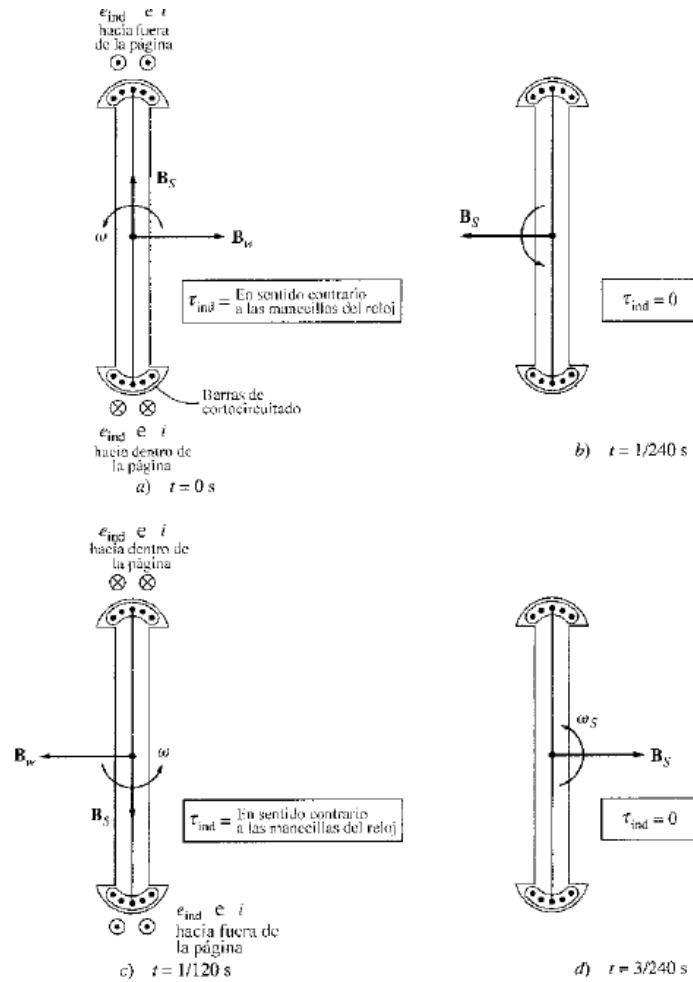


Fig. 2.5 Desarrollo de un par unidireccional con devanados de amortiguación de un motor sincrónico.

Estos devanados tienden a atenuar la carga u otros transitorios en la máquina. Por esta razón los devanados de amortiguación también se denominan *devanados de atenuación*. Los devanados de amortiguación se utilizan también en generadores sincrónicos en los que cumplen una función de estabilización similar, cuando el generador está operando en paralelo con otros generadores sobre un barraje infinito. Si ocurre una variación en el par ejercido sobre el eje del generador, su rotor se aceleraría o desaceleraría momentáneamente; estos cambios son contrarrestados por los devanados de amortiguación. Los devanados de amortiguación mejorarán la estabilidad del sistema de potencia reduciendo la magnitud de los transitorios de potencia y de par.



Los devanados de amortiguación son responsables de la mayoría de la corriente subtransitoria en una máquina sincrónica en falla. Un cortocircuito en los terminales del generador es justamente otra forma de transitorio, y los devanados amortiguadores responden muy rápidamente a este fenómeno.

2.1.3 Valores nominales en los motores sincrónicos.

Puesto que los motores sincrónicos son físicamente iguales a los generadores sincrónicos, los valores nominales de las dos máquinas también son iguales. La única gran diferencia reside en que un valor alto de E_A produce un factor de potencia en *adelanto*, en lugar de uno en *atraso*, y en consecuencia, el efecto del límite de máxima corriente de campo se expresa como un valor nominal a un factor de potencia *en adelanto*. Así mismo, puesto que la salida de un motor sincrónico es potencia mecánica, el valor nominal de la potencia de un motor sincrónico está dado usualmente en caballos de potencia en lugar de kilovatios.

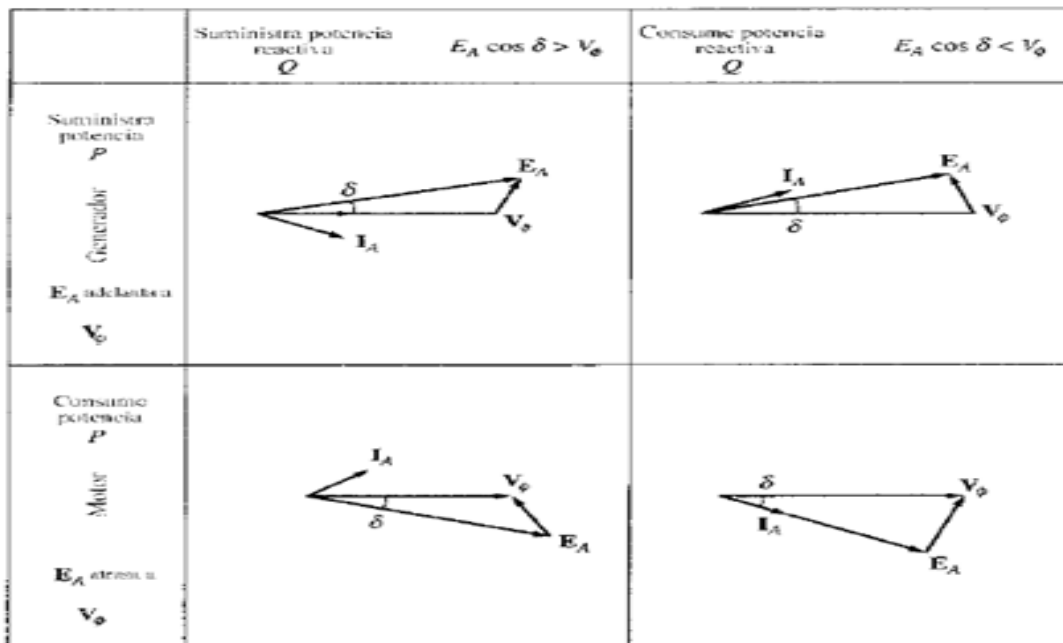


Fig. 2.6 Diagramas fasoriales que muestran la generación y el consumo de potencia real P y de potencia reactiva Q por generadores y motores sincrónicos.

En general, los motores sincrónicos son más adaptables a aplicaciones de bajas velocidades y altas potencias que los motores de inducción. Por tanto, son utilizados para cargas de baja velocidad y alta potencia.

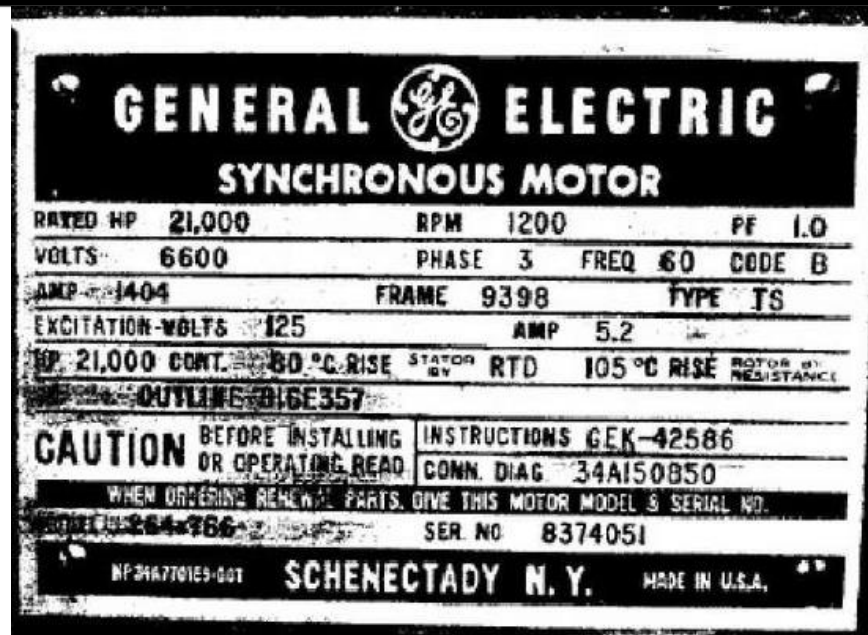


Fig. 2.7 muestra la placa de características de un motor sincrónico de gran potencia. Además de la información mostrada en la figura, un motor sincrónico pequeño debería tener en su placa de características un valor de factor de servicio.

2.2.1 Arranque de motores de inducción monofásicos.

Como se explicó antes, un motor monofásico de inducción no tiene par de arranque intrínseco. Existen tres técnicas para arrancar estos motores monofásicos de inducción, que se clasifican de acuerdo con los métodos utilizados para producir su par de arranque. Estas técnicas de arranque difieren en el costo y en la cantidad de par producido; un ingeniero utiliza la técnica menos costosa que cumpla los requerimientos de par en una aplicación dada. Las tres principales técnicas son:

Devanados de fase partida

Devanados con capacitor

Polos estáticos sombreados

Estas tres técnicas de arranque son métodos para lograr que uno de los dos campos magnéticos giratorios sea más fuerte que el otro en el motor y, en consecuencia, dar a éste un "apoyo" inicial en una u otra dirección.

Devanados de fase partida

Un motor de fase partida es un motor de inducción monofásico de dos devanados estáticos, uno principal (M) y otro auxiliar (A) (véase figura 2.9). Estos dos devanados están separados 90° eléctricos sobre el estator del motor; el devanado auxiliar está diseñado para ser desconectado del circuito, a cierta velocidad dada, mediante un interruptor centrífugo. El devanado auxiliar se diseña con una relación resistencia/reactancia mayor que la del devanado principal de modo que la corriente en el devanado auxiliar *adelanta* a la corriente del devanado principal. En general, esta relación R/X más alta se logra utilizando hilo conductor menor para el devanado auxiliar. Este hilo conductor menor es permitido en el devanado auxiliar puesto que tan sólo es utilizado para el arranque y, por tanto, no debe conducir continuamente la corriente plena.

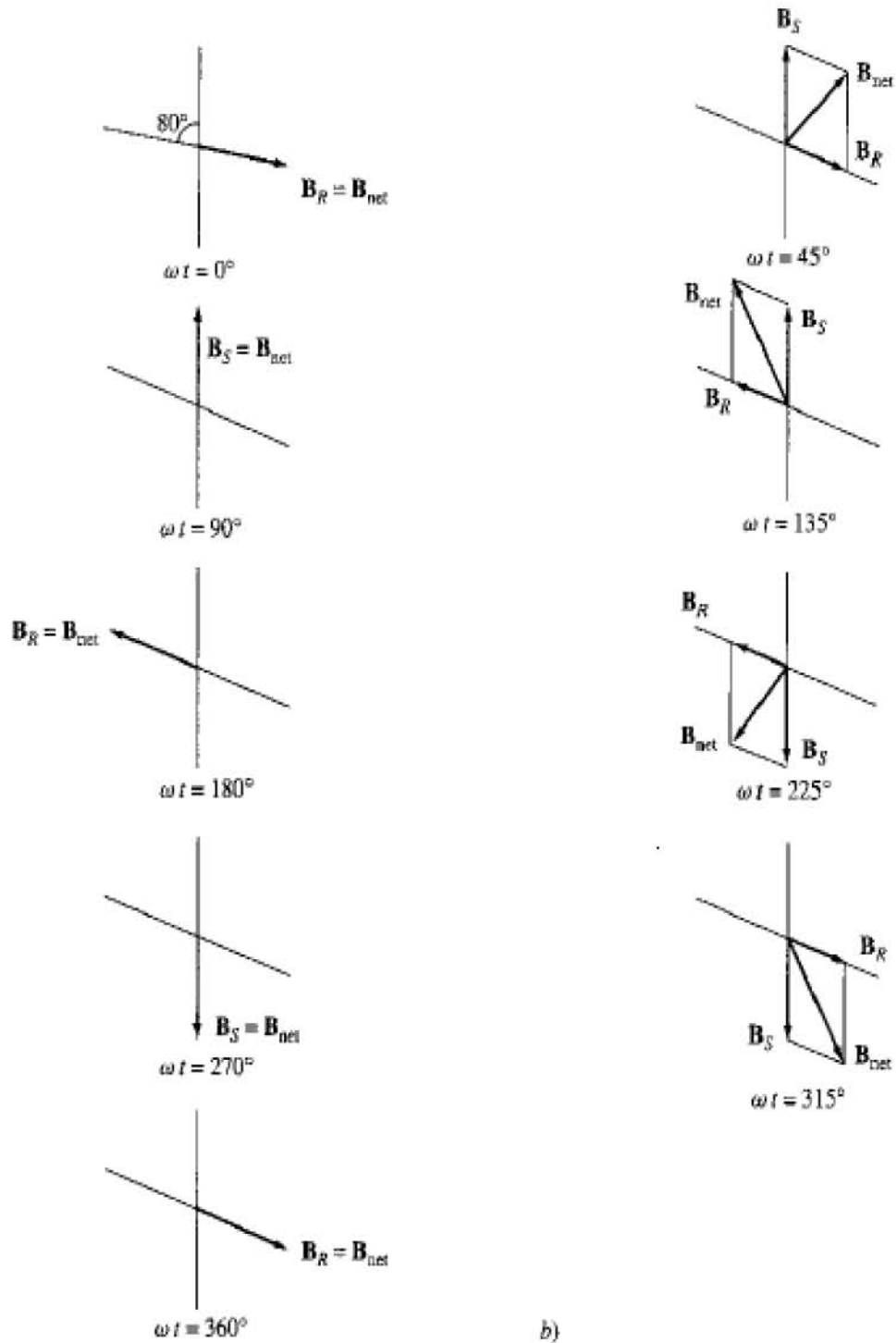


Fig. 2.8 b) vector suma de los campos magnéticos del rotor y del estator para varios tiempos, que muestran un campo magnético neto que rota en dirección contraria a las manecillas del reloj.

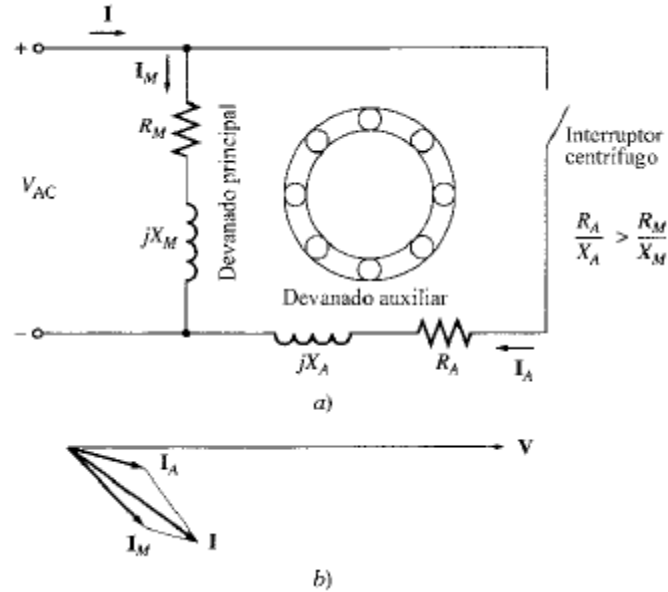


Fig. 2.9 a) Motor de inducción de fase partida. b) Corrientes en el motor en condiciones de arranque.

Para entender la función del devanado auxiliar, remítase a la fig. 2.10. Puesto que la corriente en el devanado auxiliar adelanta a la corriente del devanado principal, el campo magnético B_A alcanza su máximo valor antes que el campo magnético principal B_M . Dado que B_A llega a su valor pico primero que B_M en el campo magnético hay una rotación neta en sentido opuesto a las manecillas del reloj. En otras palabras, el devanado auxiliar logra que uno de los campos magnéticos estatóricos rotacionales opuestos sea mayor que el otro y provee un par de arranque neto para el motor. En la fig. 2.10c se muestra una característica típica par-velocidad.

La fig. 2.11 muestra un diagrama del corte de un motor de fase partida. Es fácil observar los devanados principal y auxiliar (los devanados auxiliares son los hilos conductores de menor diámetro) y el interruptor centrífugo que desconecta del circuito los devanados auxiliares cuando el motor se aproxima a su velocidad de operación.

Los motores de fase partida tienen un par de arranque moderado justamente con baja corriente de arranque y se utilizan para aplicaciones en las cuales no se requieren muy altos pares de arranque, tales como ventiladores, sopladores y bombas centrífugas. Se encuentran disponibles tamaños de fracción de caballo de potencia y son bastante baratos.

En un motor de inducción de fase partida, la corriente en el devanado auxiliar alcanza siempre su valor máximo antes que la corriente en el devanado principal y, por tanto, el campo magnético del devanado auxiliar alcanza siempre su máximo antes que el del devanado principal. La dirección de rotación del motor está determinada por el hecho de que el ángulo espacial del campo magnético del devanado auxiliar esté 90° adelante o 90° atrás del ángulo del devanado principal. Puesto que ese ángulo puede variar de 90° adelante a 90° atrás conmutando las conexiones del devanado auxiliar, *la dirección de rotación del motor puede*



invertirse al invertir las conexiones del devanado auxiliar mientras permanecen sin modificar las conexiones del devanado principal.

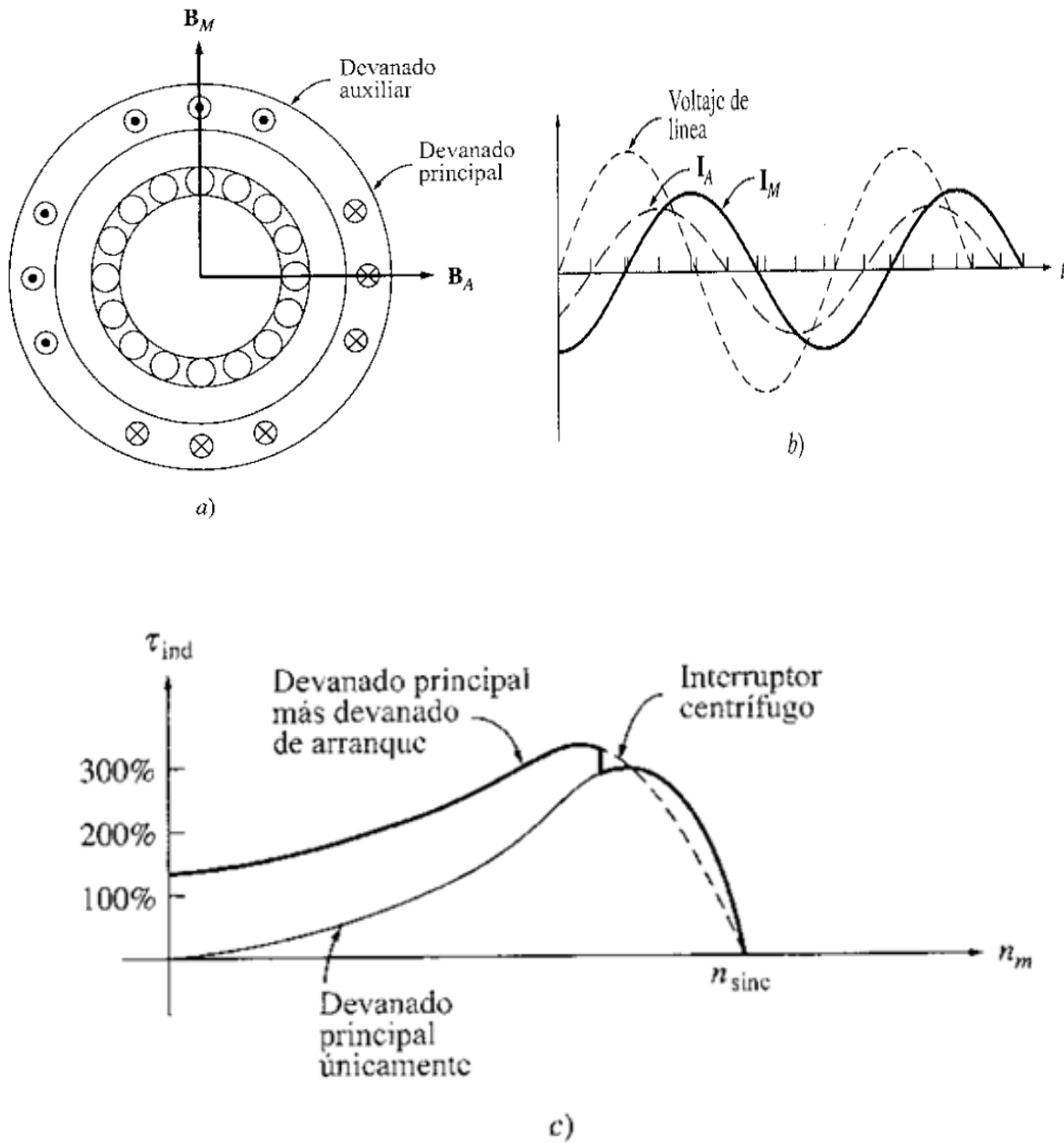


Fig. 2.10 a) Relación entre los campos magnéticos principal y auxiliar. b) I_A alcanza su valor máximo antes que I_M produce una rotación neta de los campos magnéticos en sentido contrario a las manecillas del reloj. c) Característica par-velocidad resultante.

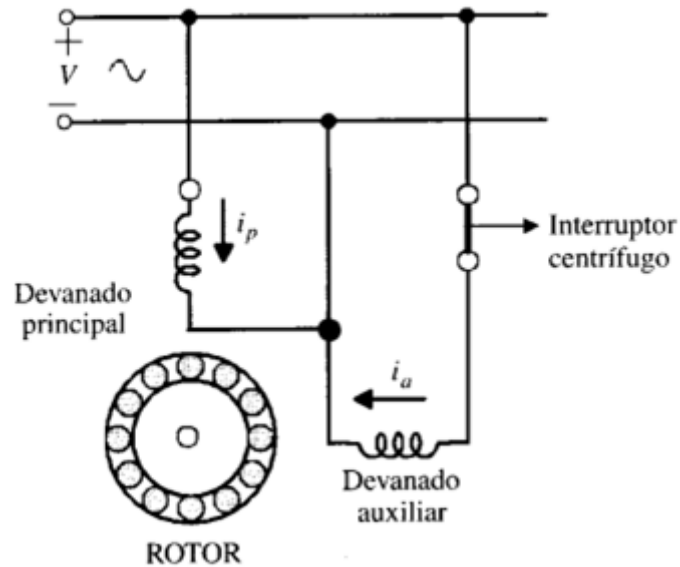


Fig. 2.11 motor fase partida que muestra los devanados principal y auxiliar y el interruptor centrifugo.

Motores con arranque por capacitor

En algunas aplicaciones, el par de arranque es insuficiente para arrancar una carga sobre el eje del motor. En esos casos, se pueden utilizar motores con arranque por capacitor (fig.2.12). En un motor con arranque por capacitor, se dispone de un capacitor en serie con el devanado auxiliar del motor. Seleccionando de manera adecuada el tamaño del capacitor, la fuerza magnetomotriz de la corriente de arranque en el devanado auxiliar puede ajustarse para igualarla a la fuerza magnetomotriz de la corriente del devanado principal, y puede lograrse que el ángulo de fase de la corriente del devanado auxiliar adelante en 90° la corriente en el devanado principal. Puesto que los dos devanados están físicamente separados 90° , una diferencia de fase de 90° en la corriente producirá un solo campo magnético rotacional uniforme del estator y el motor se comportará como si estuviera arrancando conectado a una fuente de potencia trifásica. En este caso, el par de arranque del motor puede sobrepasar 300% de su valor nominal (véase fig. 2.13).

Los motores con arranque por capacitor son más costosos que los de fase partida y se utilizan en aplicaciones en las cuales se requiera un alto par de arranque. Aplicaciones típicas de tales motores son los compresores, las bombas, los equipos de aire acondicionado y otros equipos que deben arrancar con carga (véase fig. 2.14).

Motores de capacitor permanente dividido y motor de capacitor de arranque-capacitor de marcha

El capacitor de arranque mejora tanto la característica par-velocidad de un motor de inducción que algunas veces se incorpora un pequeño capacitor en el devanado auxiliar del motor. Si se escoge adecuadamente el valor del capacitor, tal motor tendrá un campo magnético rotacional uniforme para alguna carga específica y se comportará como un motor trifásico de inducción en ese punto. Tal diseño se llama



motor de capacitor dividido permanente o motor de capacitor de arranque y de marcha (figura 2.15). Los motores de capacitor dividido permanente son más sencillos que los motores de arranque por capacitor puesto que no requieren interruptor de arranque. Para cargas normales son más eficientes y tienen un factor de potencia más alto y par más suave que los motores de inducción monofásicos corrientes.

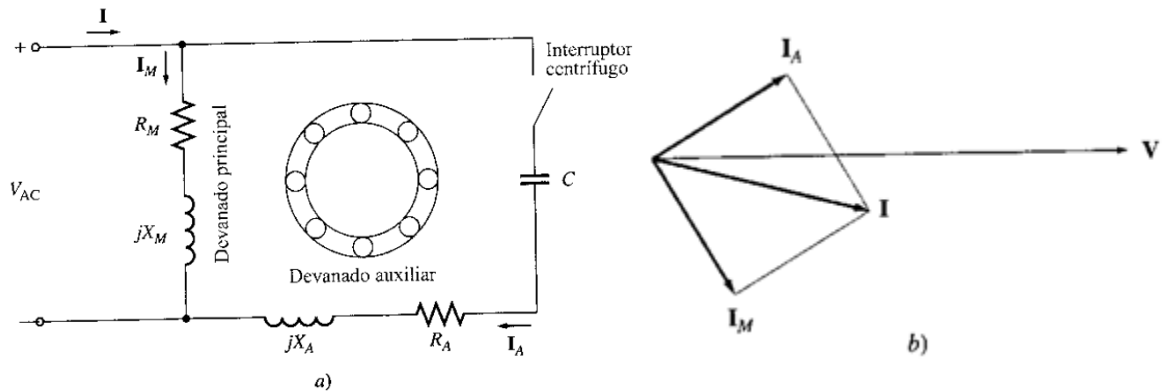


Fig. 2.12 a) Motor de inducción con arranque por capacitor. b) Angulos de corrientes en el arranque de este motor.

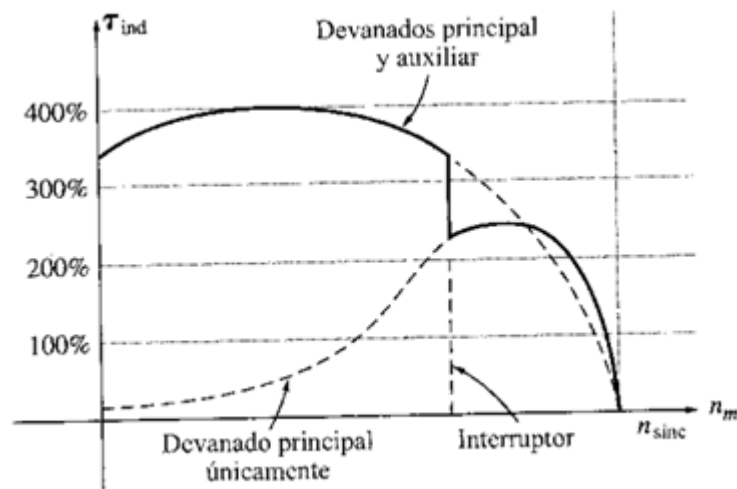


Fig. 2.13 Característica par-velocidad de un motor de inducción con arranque por capacitor.

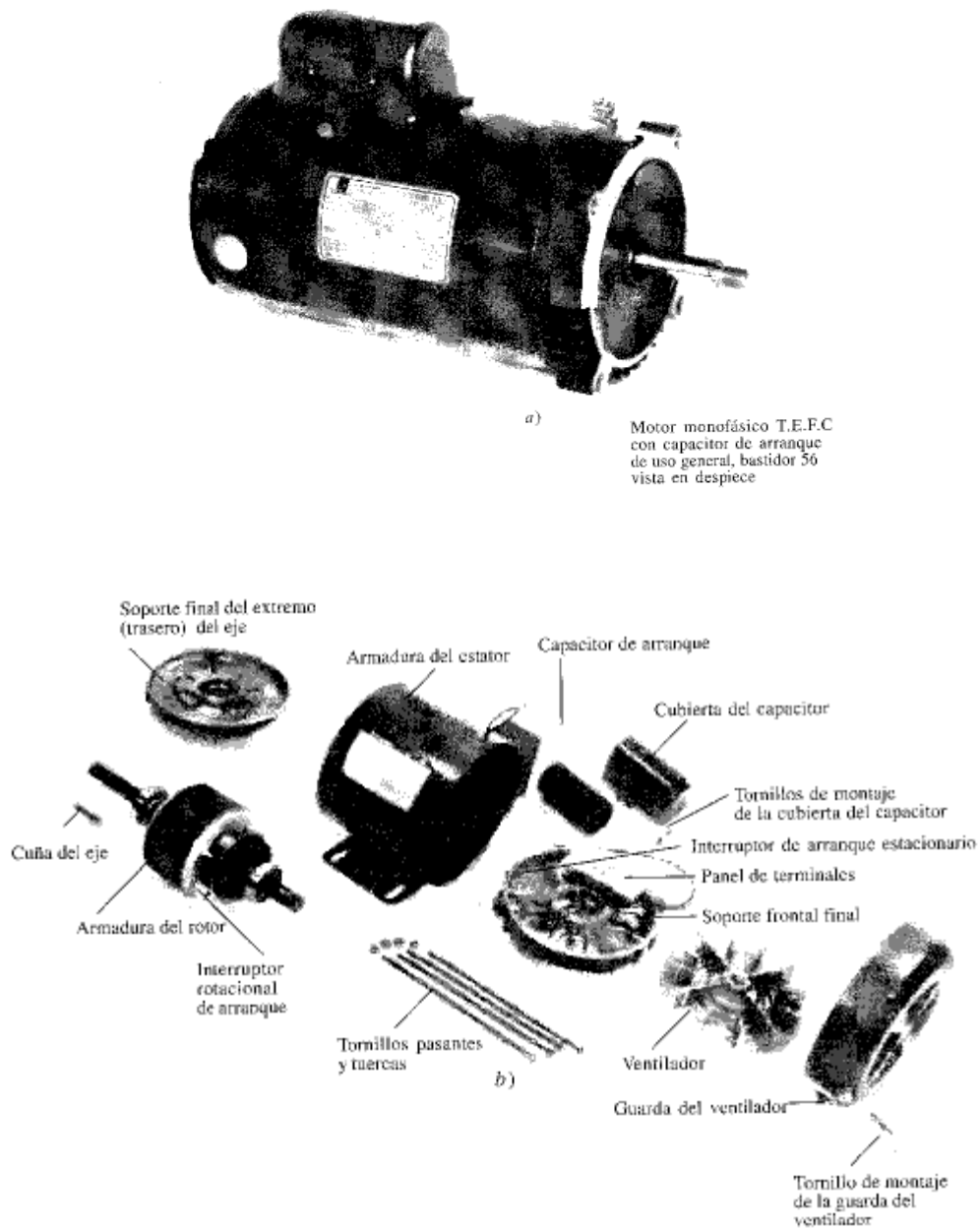


Fig. 2.14 a) Motor de inducción de arranque por capacitor. b) Vista de un motor desarmado de inducción de arranque por capacitor.

Sin embargo, los motores de capacitor dividido permanente tienen *par de arranque menor* que los motores de arranque por capacitor puesto que el capacitor debe ser dimensionado para balancear las corrientes en los devanados principal y auxiliar en condiciones normales de carga. Dado que la comente de arranque es mucho



mayor que la corriente de carga normal, un capacitor que balancee las fases en cargas normales las deja muy desbalanceadas en condiciones de arranque. Si se requiere un par de arranque lo más alto posible y las mejores condiciones de operación, se pueden utilizar dos capacitores con el devanado auxiliar. Los motores con dos capacitores se llaman *motores de capacitor de arranque, capacitor de marcha* o *motores con capacitor de dos valores* (fig. 2.16). El capacitor mayor está presente en el circuito sólo durante el arranque, cuando asegura que las corrientes en los devanados principal y auxiliar estén casi balanceadas, para obtener pares de arranque muy altos. Cuando el motor ha alcanzado velocidad, el interruptor centrífugo abre y el capacitor permanente se deja solo en el circuito del devanado auxiliar. El capacitor permanente es suficientemente grande para balancear las corrientes para cargas normales del motor de modo que éste opera de nuevo con alto par y alto factor de potencia. El capacitor permanente en tal motor equivale típicamente a entre 10 y 20% del tamaño del capacitor de arranque.

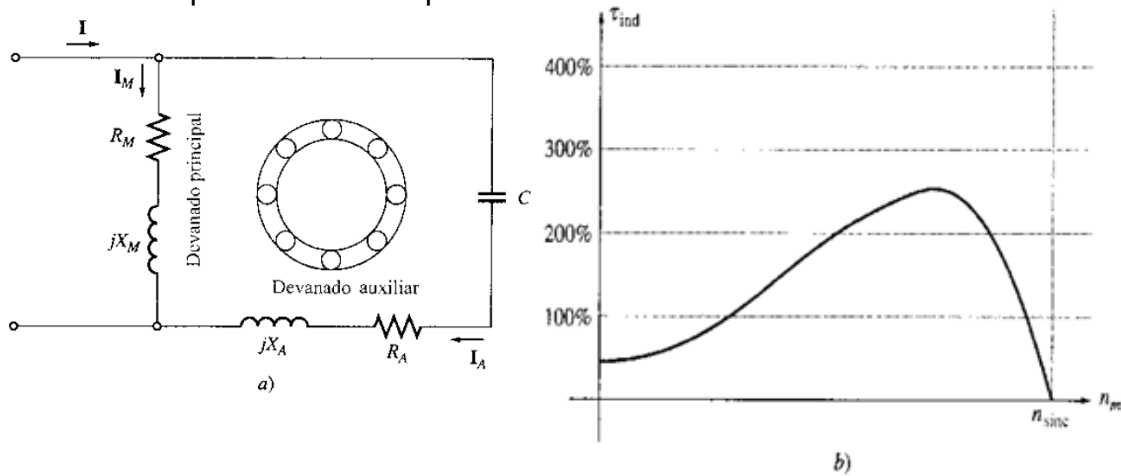


Fig. 2.15 a) Motor de inducción de capacitor dividido permanente. b) Característica par-velocidad de este motor.

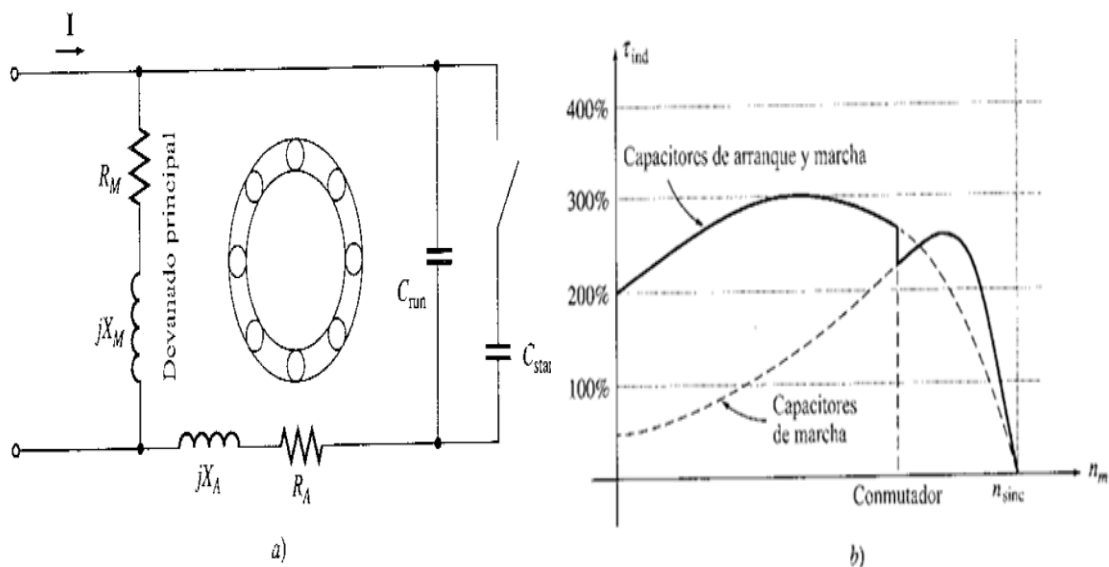


Fig. 2.16 a) Motor de inducción de capacitor de arranque capacitor de marcha. b) Característica par-velocidad de este motor.



La dirección de rotación de un motor con capacitor puede invertirse conmutando las conexiones de los devanados auxiliares.

Motores de polos sombreados

Un motor de inducción de polos sombreados es aquel que sólo tiene el devanado principal. En lugar de tener devanado auxiliar, tiene polos salientes, y una parte de cada polo está envuelta por una bobina cortocircuitada llamada *bobina de sombreado* (véase fig.2.17a). Un flujo variable con el tiempo se induce en los polos debido al devanado principal. Cuando el flujo del polo varía. Induce un voltaje y una corriente en la bobina de sombreado, las cuales se *oponen* al cambio del flujo original. Esta oposición *retarda* los cambios de flujo bajo las partes sombreadas de las bobinas y produce entonces un ligero desequilibrio entre los dos campos magnéticos rotacionales opositores del estator. La rotación neta se dirige desde la parte de la cara polar no sombreada hacia la sombreada. En la fig.2.17b se muestra la característica par-velocidad de un motor de polos sombreados.

El método de polos sombreados produce menor par de arranque que cualquier otro tipo de arranque de motores de inducción. Éstos son mucho menos eficientes y tienen mayor deslizamiento que otros tipos de motores de inducción monofásicos. Tales polos se utilizan sólo en motores muy pequeños (de menos de 1/20 hp), con requerimientos de par de arranque muy bajos. Donde sea posible utilizarlos, los motores de polos sombreados son el diseño disponible más barato.

Puesto que los motores de polo sombreado cuentan con una bobina de sombreado para su par de arranque, no hay manera fácil de invertir la dirección de rotación de tales motores. Para llevar a cabo la inversión, es necesario instalar dos bobinas de sombreado en cada cara polar y cortar selectivamente una de ellas.

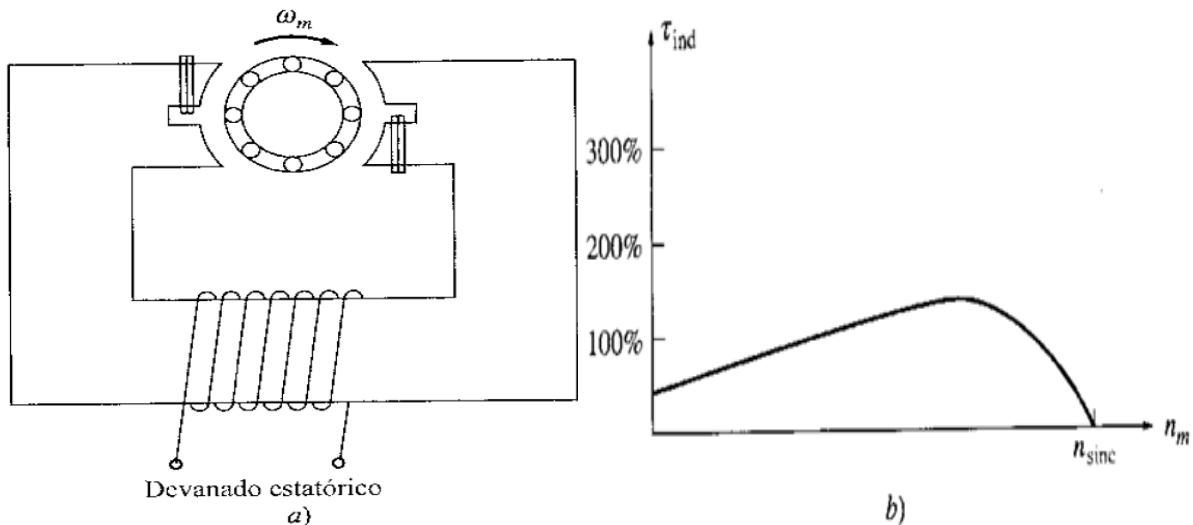


Fig. 2.17 a) Motor de inducción básico de polos sombreados. b) Característica par-velocidad resultante.



Motor monofásico de polo
sombreado uso especial,
bastidor 42

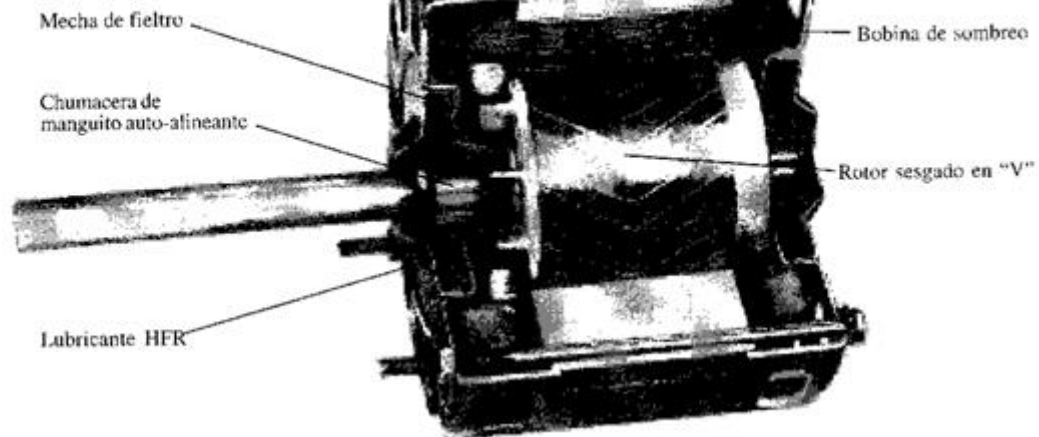


Fig. 2.18 Vista de corte de un motor de polos sombreados.

Comparación de los motores de inducción monofásicos

Los motores de inducción monofásicos pueden ser clasificados de mejor a peor, en términos de sus características de arranque y de operación.

Motor de capacitor de arranque - capacitor de marcha

Motor de arranque por capacitor

Motor con capacitor dividido permanente

Motor de fase partida

Motor de polo sombreado

El mejor motor es también el más costoso y el peor motor es el menos costoso. Así mismo, no todas las técnicas de arranque están disponibles en todos los rangos de tamaños del motor. Queda a discreción del ingeniero diseñador seleccionar el motor disponible más económico para una aplicación dada.

2.2.2 Arrancadores para motores dc.

Para que un motor de funcione de manera adecuada, debe tener incorporado algún equipo de control y protección especial. Los propósitos de este equipo son

1. Proteger el motor contra daños debidos a cortocircuitos en el equipo
2. Proteger el motor contra daños por sobrecargas prolongadas
3. Proteger el motor contra daño por corrientes de arranque excesivas
4. Proporcionar la forma adecuada para controlar la velocidad de operación del motor

Las primeras tres funciones se analizarán en esta sección



Problemas en el arranque de motores dc:

Para que un motor de funcione bien, debe ser protegido de daño físico durante el periodo de arranque. En condiciones de arranque, el motor no está girando, por tanto, $E_A = 0$ V. Puesto que la resistencia interna de un motor dc normal es muy baja comparada con su tamaño (3% a 6 %por unidad para motores medianos), fluye una corriente muy alta. La resistencia interna de un motor dc normal es muy baja comparada con su tamaño (3% a 6 %por unidad para motores medianos), fluye una corriente *muy alta*.

Consideremos por ejemplo el motor de 50 hp, 250 V, del ejemplo 1. Este motor tiene una resistencia del inducido R_A de 0.06 Q y corriente de plena carga menor que 200 A, pero la corriente de arranque es

$$I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A}$$
$$= \frac{250 - 0 \text{ V}}{0.06 \Omega} = 4167 \text{ A}$$

Esta corriente equivale a 20 veces la corriente nominal de plena carga del motor.

Es posible que un motor experimente daños graves debido a tales corrientes, a pesar de que sólo esté expuesto a ellas durante un breve instante.

Una solución al problema de corriente excesiva durante el arranque consiste en insertar una *resistencia de arranque* en serie con el inducido para restringir el flujo de corriente hasta cuando E_A crezca y sirva de limitante.

La resistencia no debe estar en el circuito permanentemente debido a que originaría pérdidas excesivas y causaría una caída demasiado grande en la característica par-velocidad del motor con un aumento de la carga.

En consecuencia, se debe insertar una resistencia en el circuito del inducido para limitar la corriente que fluye en el arranque y debe ser removida cuando la velocidad del motor crece. En la práctica moderna, una resistencia de arranque está conformada por una serie de tramos cada uno de los cuales sale del circuito del motor a medida que se incrementa la velocidad del motor para limitar la corriente en éste a un valor seguro, aunque nunca llega a un valor demasiado bajo para una rápida aceleración.

La fig.2.19 muestra un motor en derivación con una resistencia extra de arranque que puede ser sacada del circuito cerrando los contactos de 1A, 2A y 3A. Se requieren dos acciones para que un arrancador de motor sea funcional. La primera es escoger el tamaño y número de tramos de resistencia necesarios para limitar la corriente de arranque a los valores deseados. La segunda es diseñar un circuito de control que cierre los contactos de derivación de la resistencia en el tiempo adecuado para desconectar del circuito aquellas partes de la resistencia.

Algunos de los antiguos arrancadores para motor dc utilizaron resistencias de arranque continuas que eran sacadas gradualmente del circuito por una persona que movía su manubrio (fig.2.20). Este tipo de arrancador tuvo algunos problemas, como su gran dependencia de que la persona que arrancaba el motor no moviera el manubrio demasiado rápido o demasiado despacio. Si la resistencia era cortocircuitada con demasiada rapidez (antes que el motor pudiera acelerar lo



suficientemente), el flujo de corriente resultante podía ser demasiado grande. Por otra parte, si la resistencia era cortocircuitada con demasiada lentitud, la resistencia de arranque podía quemarse. Puesto que dependen de una persona para su operación correcta, estos arrancadores para motor estuvieron sujetos al problema del error humano. En la actualidad han sido casi totalmente desplazados en las nuevas instalaciones por circuitos automáticos de arranque.

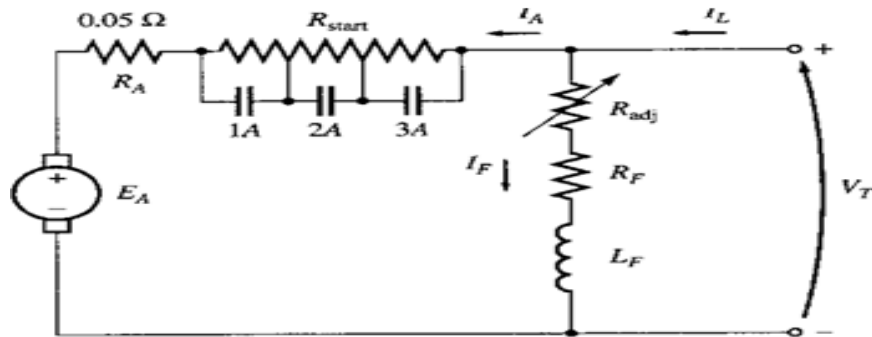


Fig. 2.19 Motor dc en derivación con resistencia de arranque en serie con el inducido. los contactos 1A,2A y 3A cortocircuitan secciones de la resistencia de arranque cuando se cierran.

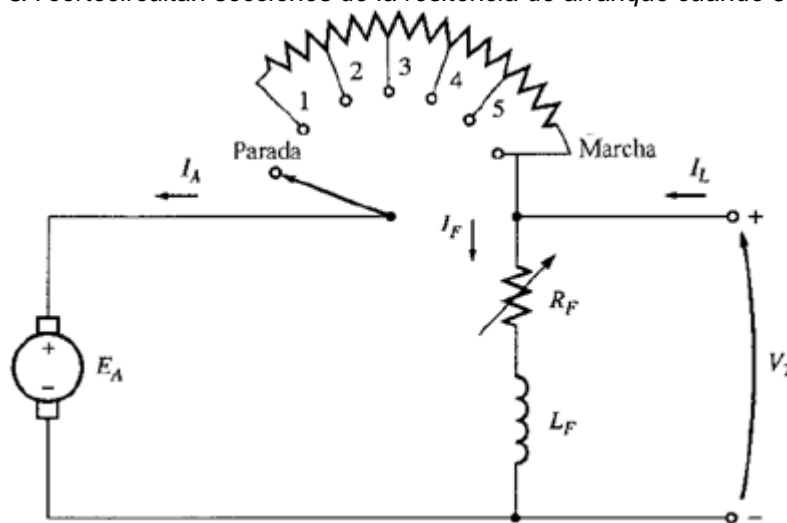


Fig. 2.20 Arrancador manual para motor dc.

Circuitos de arranque para el motor de DC

Una vez seleccionadas las resistencias de arranque, ¿cómo se pueden controlar los contactos de cortocircuitado para asegurar que cierren en el momento oportuno? Para llevar a cabo esta conmutación se utilizan varios esquemas diferentes; dos de las técnicas más comunes se examinarán en esta sección. Sin embargo es necesario presentar algunas de las componentes utilizadas en circuitos de arranque de motores.

La fig.2.21 ilustra algunos de los equipos comúnmente utilizados en los circuitos de control de motores. Tales elementos son los fusibles, interruptores pulsadores, relés, relés de temporización y relés de sobrecarga.



La fig.2.21a muestra el símbolo para un fusible. En un circuito de control de motor, los fusibles sirven para proteger el motor contra daño por cortocircuitos. Están colocados en las líneas de potencia que alimentan a los motores. Si un motor experimenta un cortocircuito, los fusibles de la línea que lo alimenta se quemarán, abriendo el circuito antes que el motor pueda sufrir daños mayores.

La fig.2.21b muestra los interruptores pulsadores de tipo resorte. Hay dos tipos básicos de tales interruptores: normalmente abiertos y normalmente cerrados. Los de contacto *normalmente abierto* están abiertos cuando el botón está en reposo, y cierran cuando el botón ha sido pulsado; los de contacto *normalmente cerrado* están cerrados cuando el botón está en reposo, y abren cuando el botón ha sido pulsado.

En la fig.2.21c se muestra un relé que consta de una bobina principal y varios contactos. La bobina principal se simboliza por un círculo, los contactos se representan como líneas paralelas. Los contactos son de dos tipos: normalmente abiertos y normalmente cerrados. Un contacto *normalmente abierto* es aquel que está abierto cuando el relé está desenergizado; un contacto *normalmente cerrado* es aquel que está cerrado cuando el relé está desenergizado. Cuando se aplica potencia eléctrica al relé (el relé es energizado) sus contactos cambian de estado: los normalmente abiertos se cierran y los normalmente cerrados se abren.

En la fig.2.21d se muestra un relé de tiempo en atraso que se comporta como un relé ordinario, excepto en que, cuando es energizado, muestra un atraso ajustable de tiempo antes que sus contactos cambien de estado.

En la fig.2.21e se muestra un relé de sobrecarga que consiste en una bobina de calentamiento y algunos contactos normalmente cerrados. La corriente que fluye al motor pasa a través de las bobinas de calentamiento. Si la carga sobre el motor llega a ser muy grande, la corriente que fluye hacia aquél calentará las bobinas del relé, lo cual causará la apertura de los contactos normalmente cerrados del relé y éstos, a su vez, activan algunos de los elementos del circuito de protección del motor.

En la fig.2.22 se muestra un circuito común para arranque de motor, el cual utiliza estas componentes. En este circuito, una serie de relés de tiempo en atraso cierran los contactos que remueven cada sección de la resistencia de arranque en el tiempo correcto, después de aplicar potencia al motor. Cuando se pulsa el botón de arranque en este circuito, se conecta el circuito del inducido del motor a su fuente de potencia y la máquina arranca con toda la resistencia en el circuito.

Sin embargo, el relé 1TD se energiza al mismo tiempo que arranca el motor, de modo que después de algún tiempo de atraso, los contactos 1TD cierran y remueven parte de la resistencia de arranque del circuito. Simultáneamente, el relé 2TD se energiza y después de otro atraso en tiempo, los contactos de 2TD se cierran removiendo la segunda parte de la resistencia reguladora de arranque. Cuando los contactos de 2TD se cierran, el relé 3TD se energiza de tal manera que el proceso se repite de nuevo y al final, el motor gira a plena velocidad sin resistencia de



arranque en su circuito. Si los atrasos en tiempo se escogen de manera adecuada, las resistencias de arranque se pueden cortocircuitar en el momento justo para limitar la corriente del motor a sus valores de diseño.

Otro tipo de arrancador para motor se muestra en la fig.2.23. Aquí, una serie de relés determinan cuál es el valor de E_A en el motor y cortocircuitan la resistencia de arranque cuando E_A se eleva a valores predeterminados. Este tipo de arrancador es mejor que el anterior, puesto que si el motor está bastante cargado y arranca con más lentitud que la normal, su resistencia del inducido está aún desconectada cuando su corriente cae al valor adecuado.

Nótese que ambos circuitos de arranque tienen un relé en el circuito de campo marcador como FL. Este es un *relé de pérdida de campo*. Si se pierde la corriente de campo por alguna razón, el relé de pérdida de campo se desenergiza, lo cual a su vez desconecta la potencia que llega al relé M. Cuando se desenergiza el relé M, sus contactos normalmente abiertos abren y desconectan el motor de la fuente de suministro.

Este relé evita que el motor se embale si pierde su corriente de campo.

Nótese también que hay un relé de sobrecarga en cada circuito del arrancador del motor. Si la potencia tomada del motor es excesiva, estos relés se calentarán por encima de su valor fijado y abren los contactos normalmente cerrados OL, desenergizando el relé M. Cuando se desenergiza el relé M, sus contactos normalmente abiertos se abren y desconectan el motor de la fuente de alimentación para protegerlo contra daño por cargas excesivas prolongadas.

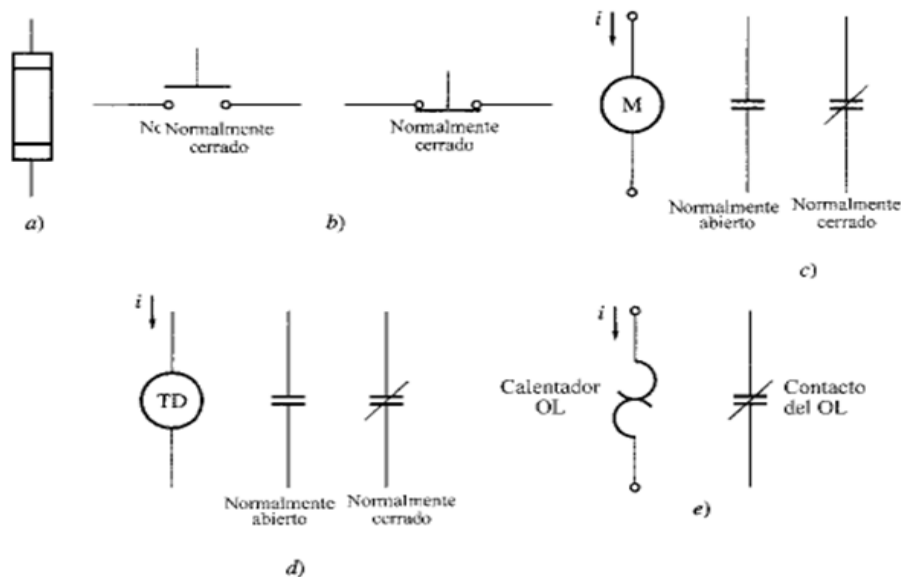


Fig. 2.21 a) Fusible. b) Interruptores pulsadores normalmente abiertos y normalmente cerrados. c) Bobina de relé y contactos. d) Relé de tiempo en atraso y contactos. e) Relé de sobre carga y sus contactos normalmente cerrados.

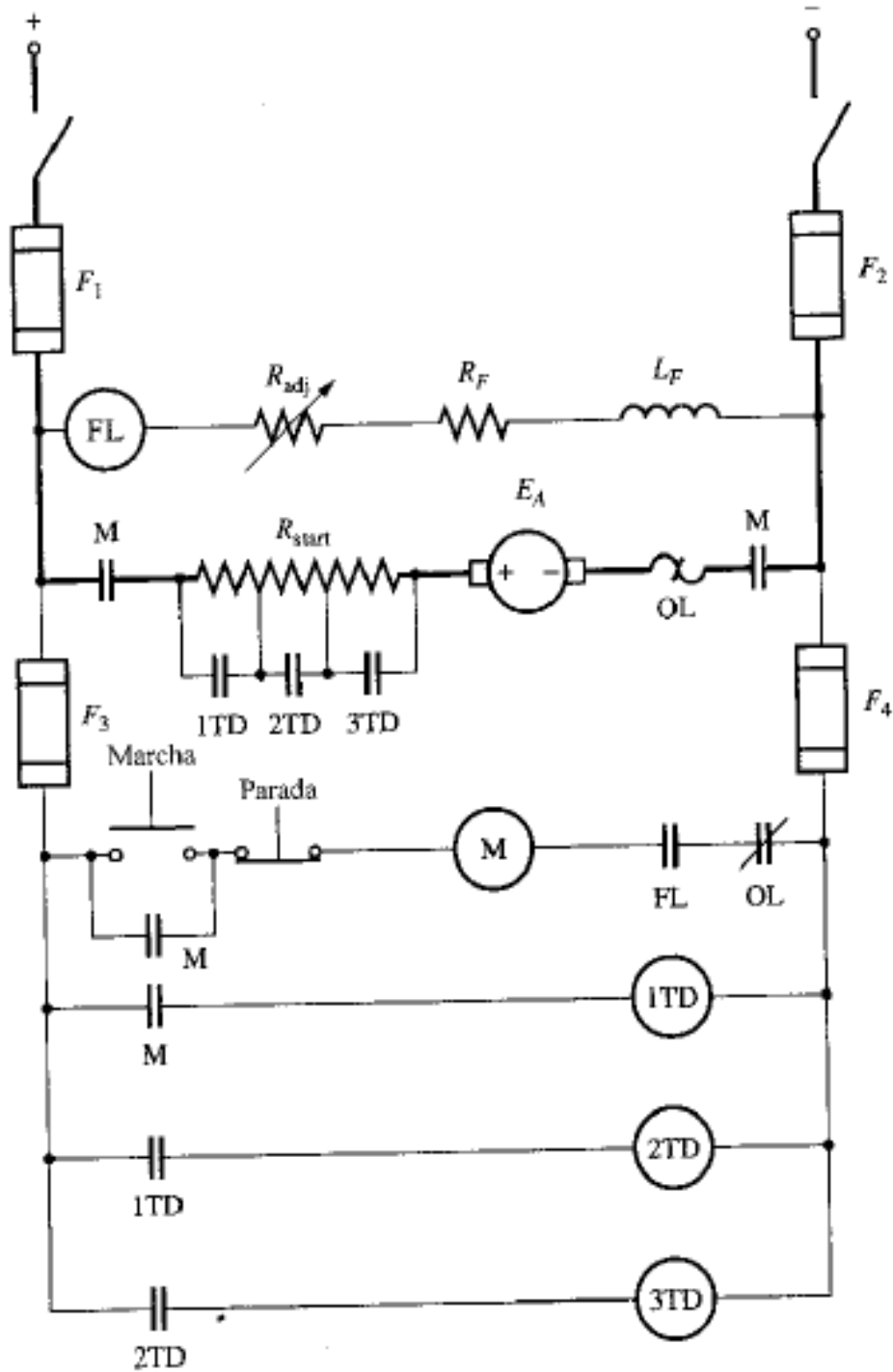


Fig. 2.22 Circuito para arrancador de motor dc con relés de tiempo en atraso para cortocircuitar la resistencia de arranque.

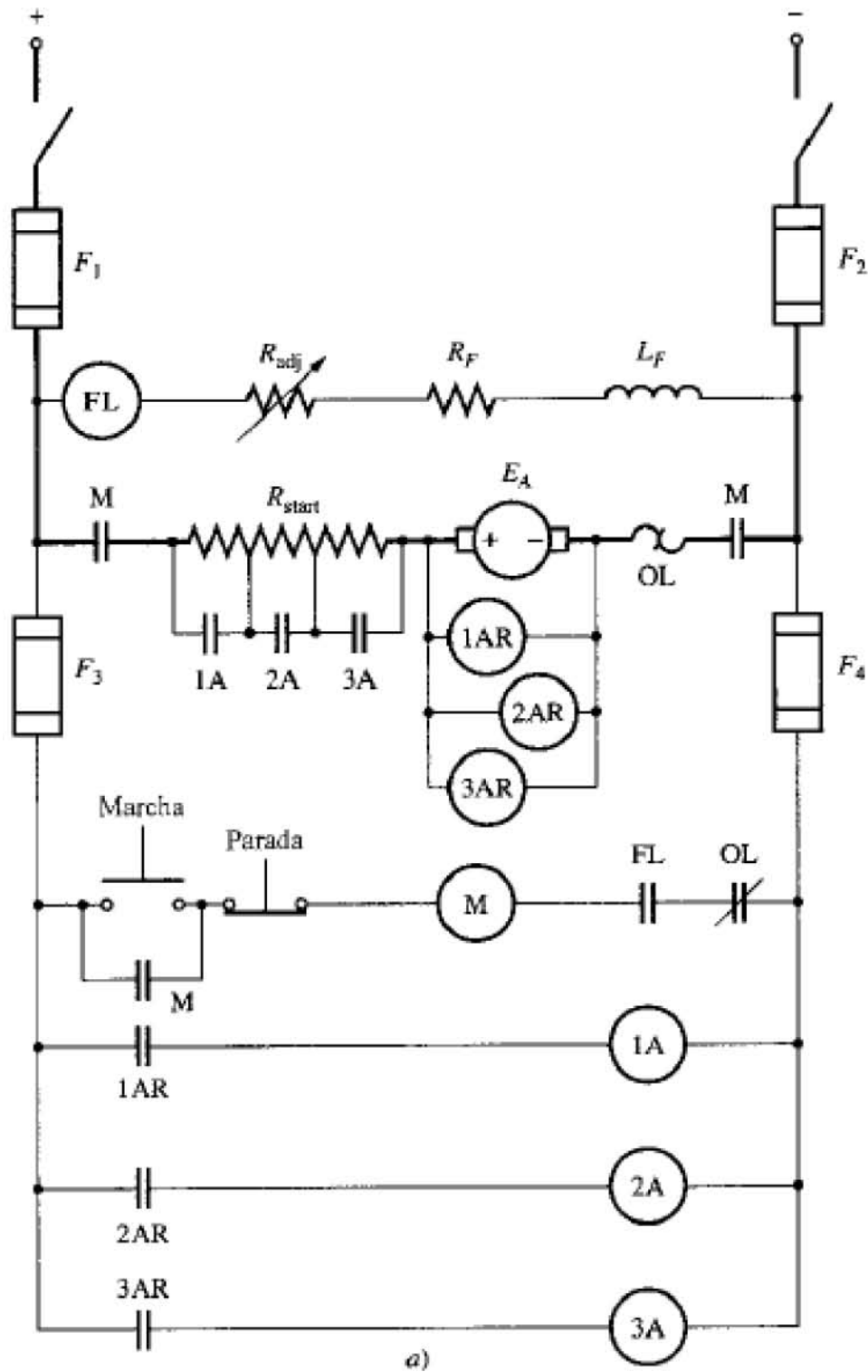


Fig. 2.23 Circuito de arranque para motor dc que utiliza relés sensores de contra tensión para cortocircuitar la resistencia de arranque.



2.3.1 Arranque de motores asíncronos trifásicos.

Introducción:

Es necesario limitar la corriente de arranque de los motores asíncronos trifásicos, ya que éstos están conectados a la red de distribución de energía eléctrica en paralelo con otros abonados, que podrían sufrir bajadas momentáneas de tensión de suministro durante el arranque de los mencionados motores debido a la caída de tensión provocada por la impedancia de las líneas de transporte. Para regular estos fenómenos, existen una serie de normas que imponen limitaciones en cuanto a corrientes máximas admisibles que se resumen en la siguiente tabla:

POTENCIA MOTOR(EN KW)	NOMINAL	DEL	$I_{ARRANQUE}/I_{PLENA\ CARGA}$
DE 0.75 A 1.5		4.5	
DE 1.5 A 5		3.0	
DE 5 A 15		2.0	
DE MAS DE 15		1.5	

Tabla 2

MÉTODO DIRECTO

Se aplica a aquellos motores de una potencia nominal menor de 5KW (6.8 C.V.), aunque en la práctica sólo se aplica para motores de potencia nominal menor de 5C.V.

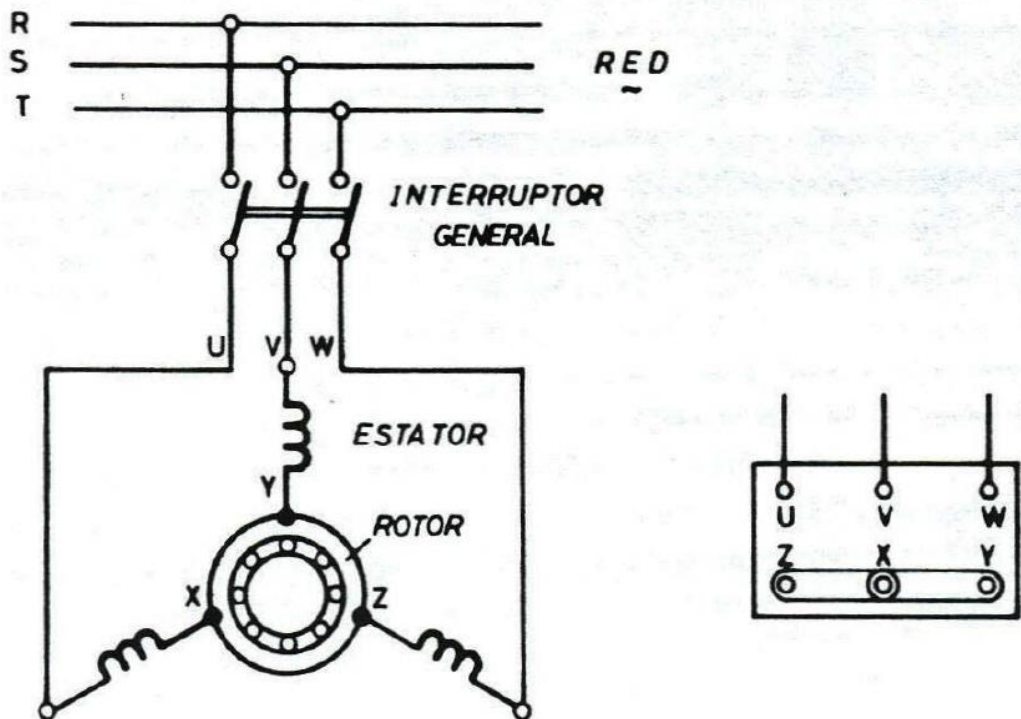
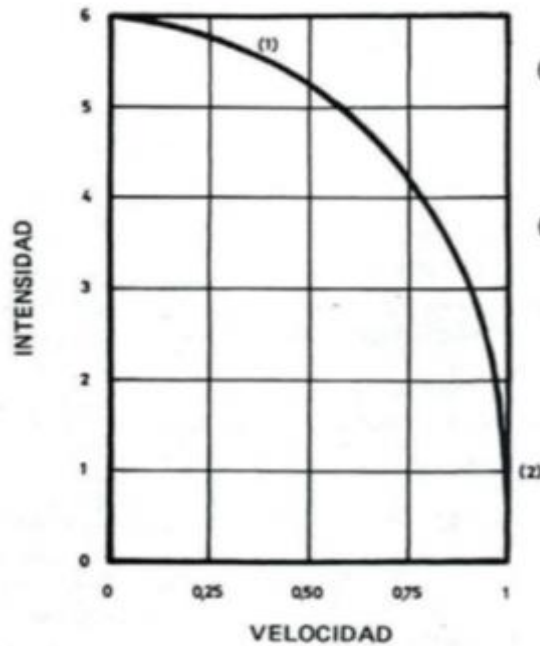


Fig. 2.24 Arranque de motor directo.

A continuación se adjuntan las curvas de intensidad/velocidad y de par/velocidad del motor con este tipo de arranque.

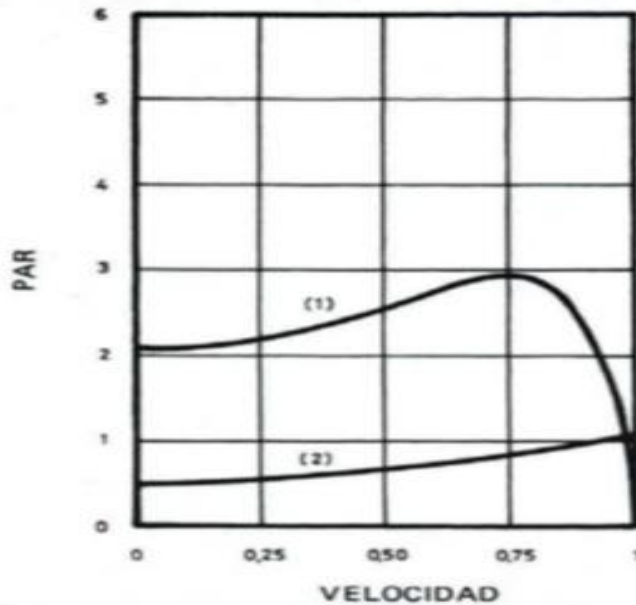


CURVA INTENSIDAD-VELOCIDAD



- (1) Conexión
 $I = 6I_n$ (en el supuesto de que se inicie el arranque estando sometido a plena carga).
- (2) Régimen de marcha con motor a plena carga.
El motor ha adquirido la velocidad asincrónica que le corresponde.
 $I = I_n$.

CURVA PAR-VELOCIDAD



- (1) Par motor
- (2) Par resistente

Fig. 2.25 curva intensidad-velocidad, par-velocidad.

MÉTODO DE ARRANQUE POR AUTOTRANSFORMADOR

Se aplica a motores cuya potencia nominal es mayor que 5KW.

Sabemos que la corriente de arranque vale

$$I^e_{ARRANQUE} = (I^r/m)^2 \text{ ARRANQUE} = (V^e)^2 / [(R^e + m^2 \cdot R^r]^2 + (X^e + m^2 \cdot X^r)^2]$$

Es decir, que la corriente de arranque depende de la tensión de alimentación del motor. Si disminuimos la tensión de alimentación en el momento del arranque,



reduciremos la corriente de arranque. Una vez que el motor alcance una determinada velocidad, con $s < 1$, procederemos a restablecer la tensión nominal de alimentación.

Numero de puertos de arranque.	Tension de motor en el primer pto.	Corriente absorbida por el motor con el primer pto.	Par de arranque en el primer pto.
2	65% de V_{Linea}	$42\% I_{arranque\ directo}$	42% del par
3	55% de V_{Linea}	$30\% I_{arranque\ directo}$	30% del par

Tabla 3

Este método de arranque presenta los siguientes inconvenientes:

- Disminuye el par de arranque al disminuir la tensión de alimentación en un factor de x^2 , siendo x el factor de reducción de la tensión de alimentación ($V^e = x \cdot V_N^e$).
- El motor se deja de alimentar durante el cambio de una tensión a otra.
- Aumenta el tiempo de arranque.

En las figuras que se adjuntan a continuación puede analizarse este método de arranque de los motores asíncronos trifásicos. Las diferentes implementaciones que se proponen están realizadas con automatismos eléctricos (relés, pulsadores, temporizadores, contactores y sus contactos auxiliares).

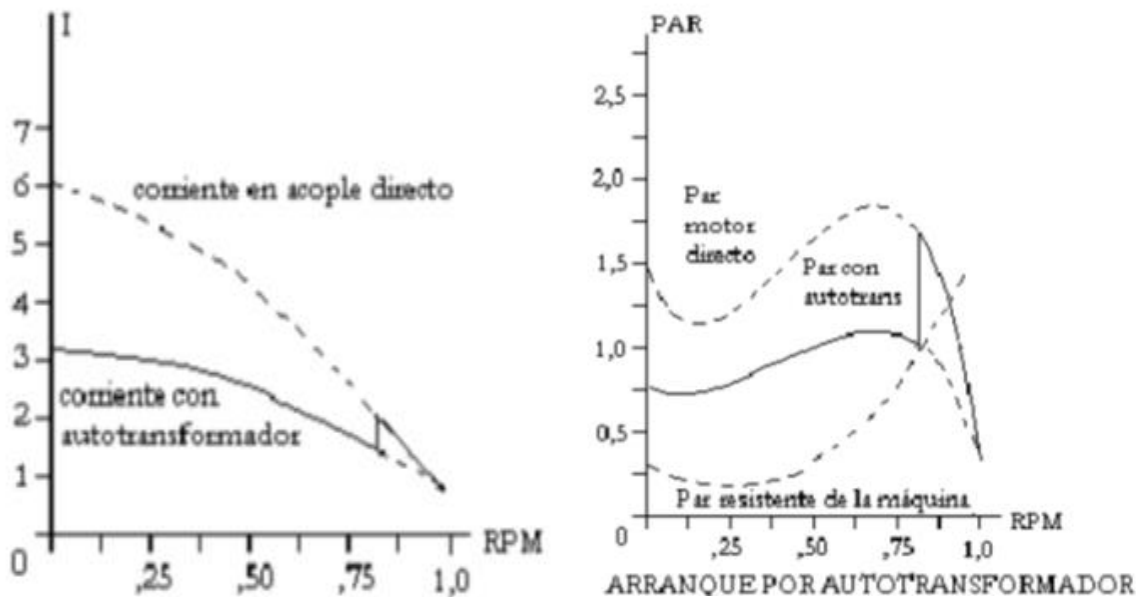
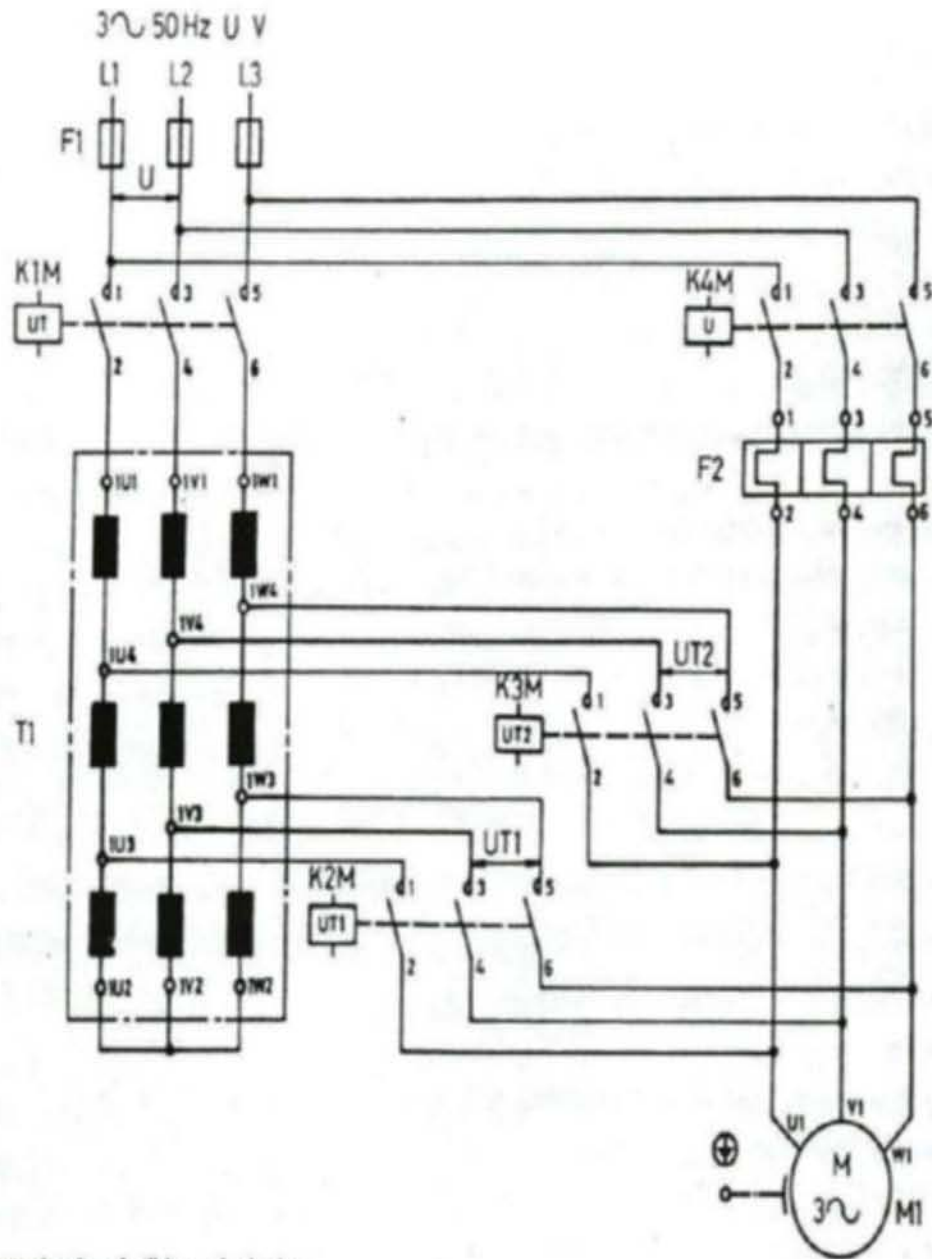


Fig. 2.26 Característica intensidad-velocidad y par-velocidad de un arranque por auto transformador.



- F1 Cortacircuitos fusibles principales
- F2 Relé térmico de protección
- K1M Contactor conexión autotransformador
- K2M Contactor tensión de arranque primer punto
- K3M Contactor tensión de arranque segundo punto
- K4M Contactor plena tensión
- M1 Motor trifásico
- T1 Autotransformador trifásico

Fig. 2.27 Circuito principal de un arrancador por autotransformador en tres etapas con relé térmico de protección que entra en funcionamiento una vez que entra en funcionamiento una vez que ha finalizado el arranque del motor.



ARRANQUE POR CAMBIO DE LA CONEXIÓN DE LOS DEVANADOS INDUCTORES EN EL MOMENTO DEL ARRANQUE. ARRANQUE ESTRELLA-TRIÁNGULO.

Este método de arranque se puede aplicar tanto a motores de rotor devanado como a motores de rotor en jaula de ardilla, la única condición que debe de cumplir el motor para que pueda aplicársele este método de arranque es que tenga acceso completo a los devanados del estator (6 bornes de conexión).

PROCEDIMIENTO: consiste en aplicar en el arranque la tensión nominal del motor en la conexión de triángulo cuando éste está conectado en estrella, con lo que la tensión de alimentación se reduce en $\sqrt{3}$ y el par de arranque en $1/3$. Una vez que el motor ha empezado a girar (se aconseja no pasar de la conexión estrella a la conexión triángulo hasta que el motor no haya adquirido, al menos, una velocidad del 80% de la nominal), se conmuta la conexión de los devanados a triángulo, con lo que se le está aplicando la tensión nominal de alimentación.

La corriente de arranque se reduce en $1/\sqrt{3}= 0.6$ en relación con la corriente de arranque directo.

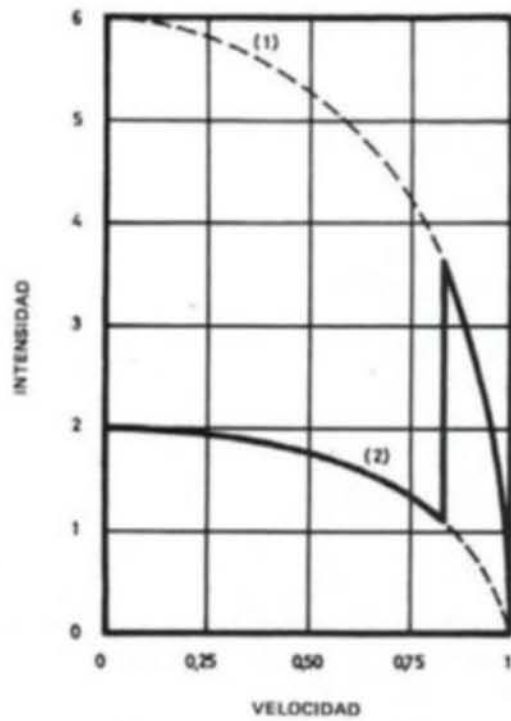
Este método presenta los siguientes inconvenientes:

- Disminuye el par de arranque al disminuir la tensión de alimentación en un factor de $1/3$.
- El motor se deja de alimentar durante el cambio de la conexión de estrella a triángulo en los devanados del estator.
- Aumenta el tiempo de arranque.

En las figuras que se adjuntan a continuación puede analizarse este método de arranque de los motores asíncronos trifásicos. Las diferentes implementaciones que se proponen están realizadas con automatismos eléctricos (relés, pulsadores, temporizadores, contactores y sus contactos auxiliares).



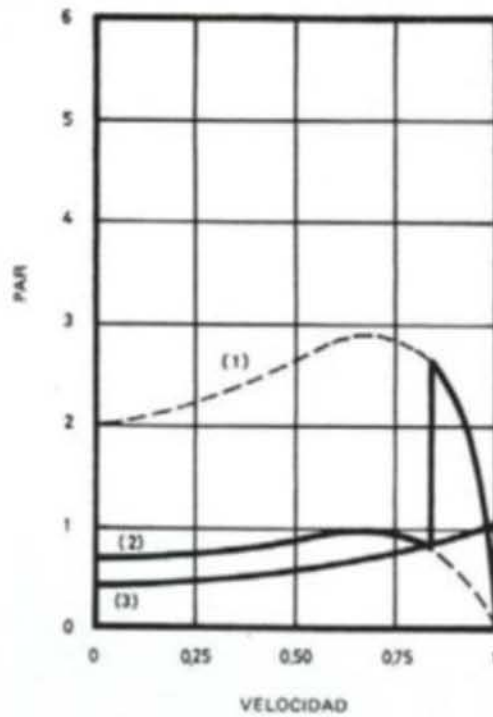
CURVAS INTENSIDAD-VELOCIDAD



(1) Intensidad en Δ

(2) Intensidad en λ

CURVAS PAR-VELOCIDAD



(1) Par motor en Δ

(2) Par motor en λ

(3) Par resistente

Fig. 2.28 Característica intensidad-velocidad y par-velocidad para un arranque estrella-triángulo.

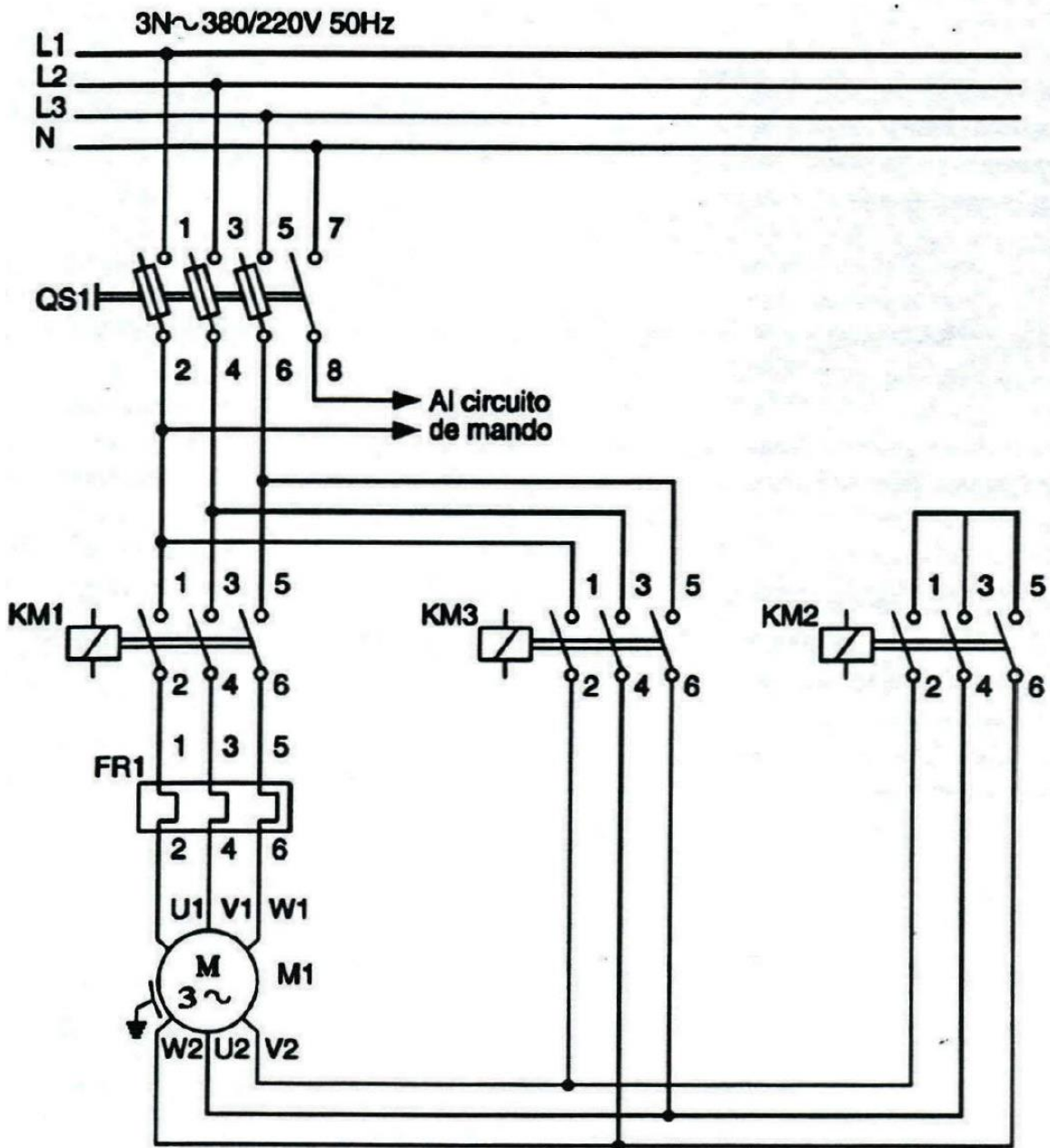


Fig. 2.29 Circuito principal de un arranque estrella-triángulo.



ARRANQUE POR VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL ROTOR

Este método de arranque sólo se puede aplicar a motores de rotor devanado. Como se comprueba fácilmente, al introducir una resistencia adicional en el devanado del rotor, se disminuye la corriente de arranque con relación a la corriente absorbida por el método de arranque directo.

PROCEDIMIENTO: inicialmente introducir una resistencia adicional que haga que el par de arranque sea el máximo. Posteriormente, ir reduciendo la resistencia adicional hasta cero.

Este método presenta los siguientes inconvenientes:

- El motor se deja de alimentar durante el cambio de una tensión a otra.
- Aumenta el tiempo de arranque
- Es un método caro puesto que los motores de rotor devanado son más caros que los de jaula de ardilla.
- Aumentan las pérdidas debido a la potencia disipada en la resistencia adicional

En las figuras que se adjuntan a continuación puede analizarse este método de arranque de los motores asíncronos trifásicos. Las diferentes implementaciones que se proponen están realizadas con automatismos eléctricos (relés, pulsadores, temporizadores, contactores y sus contactos auxiliares).

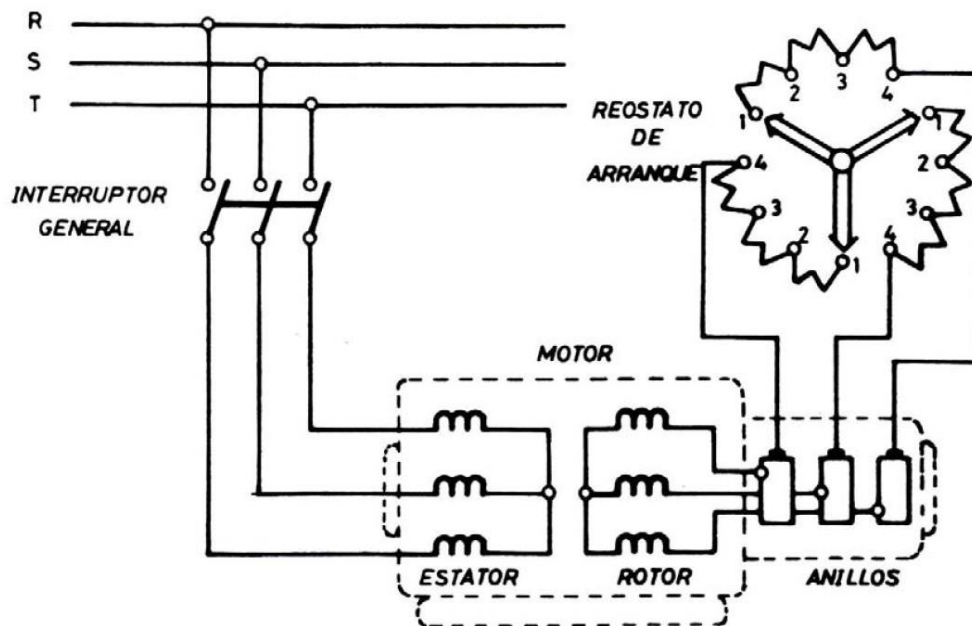


Fig. 2.30 Motor asíncrono de rotor devanado y reóstato de arranque correspondiente.

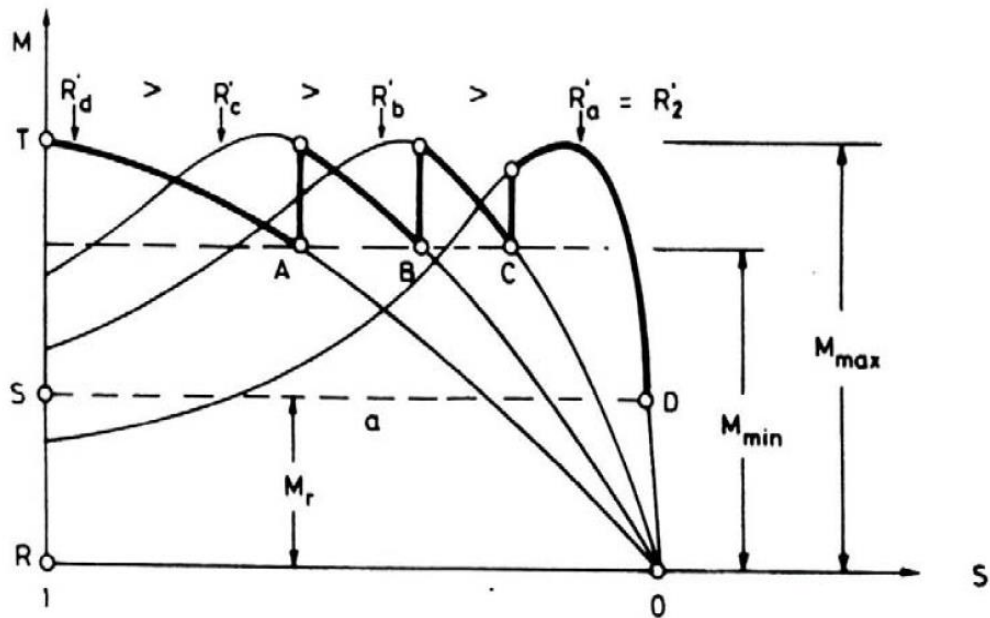


Fig.2.31 Característica de arrancador rotorico de resistencias en tres etapas.

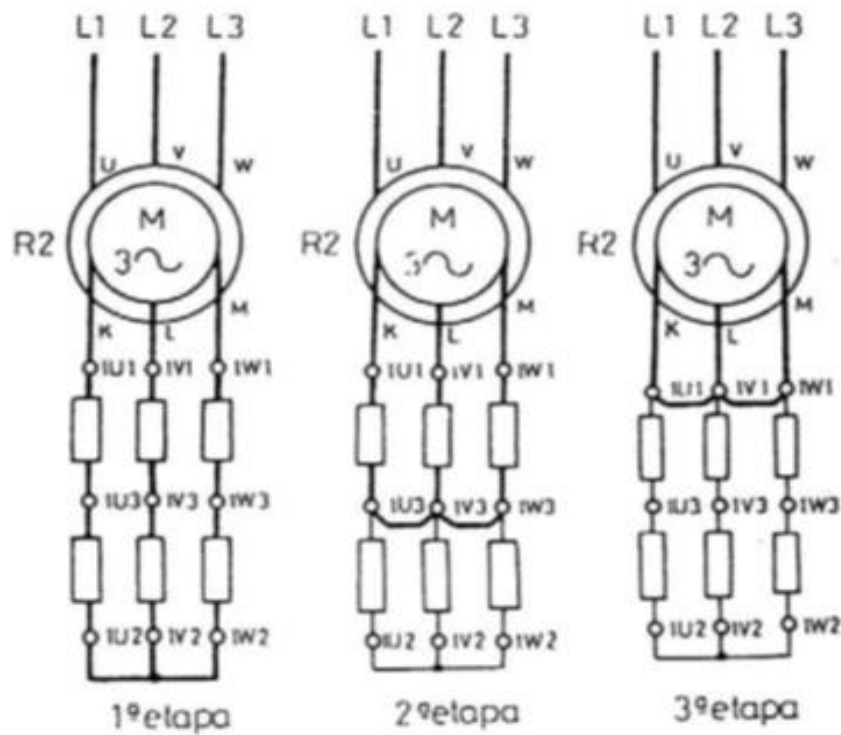
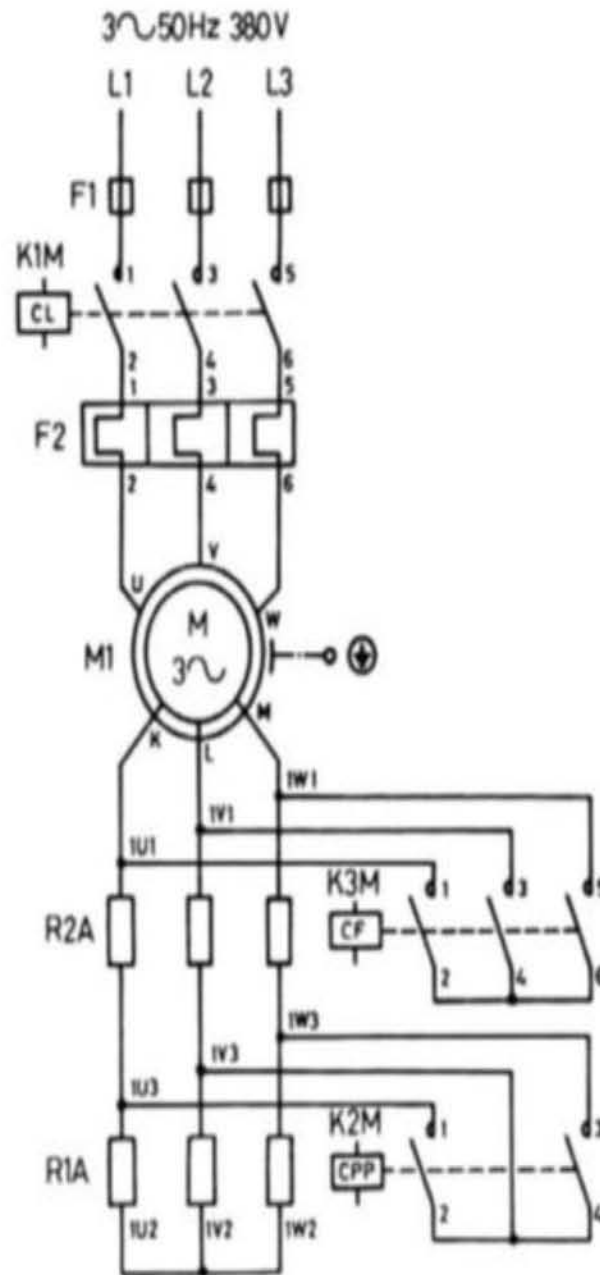
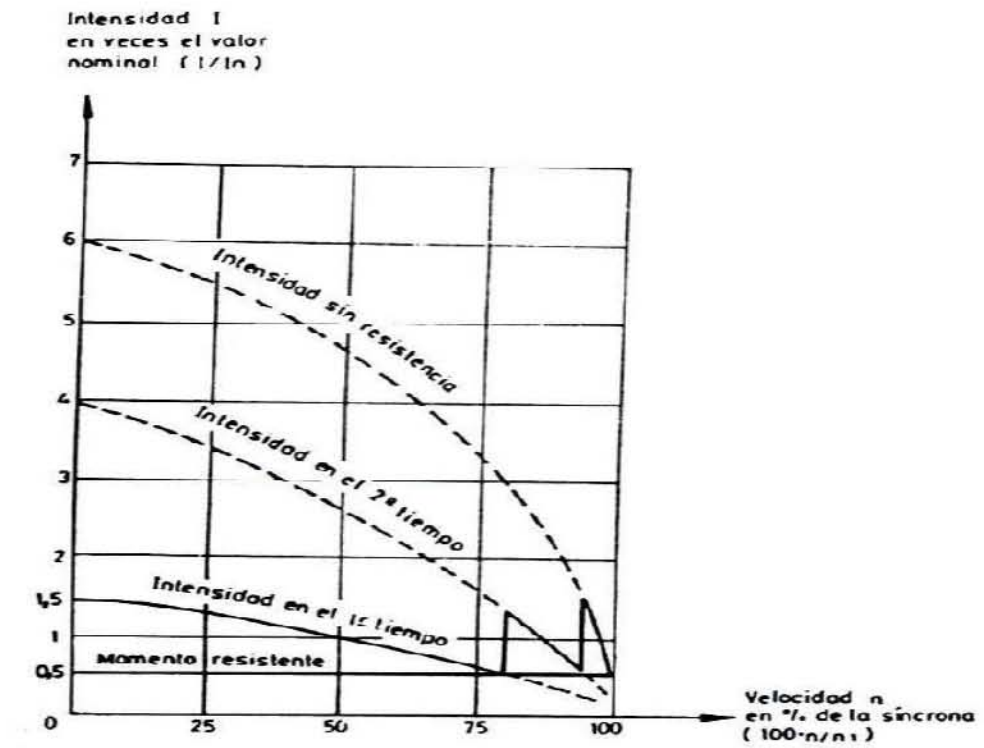


Fig. 2.32 Conexionado de las resistencias para el arranque de un motor asíntrico trifásico con rotor de anillos rozantes en tres etapas.



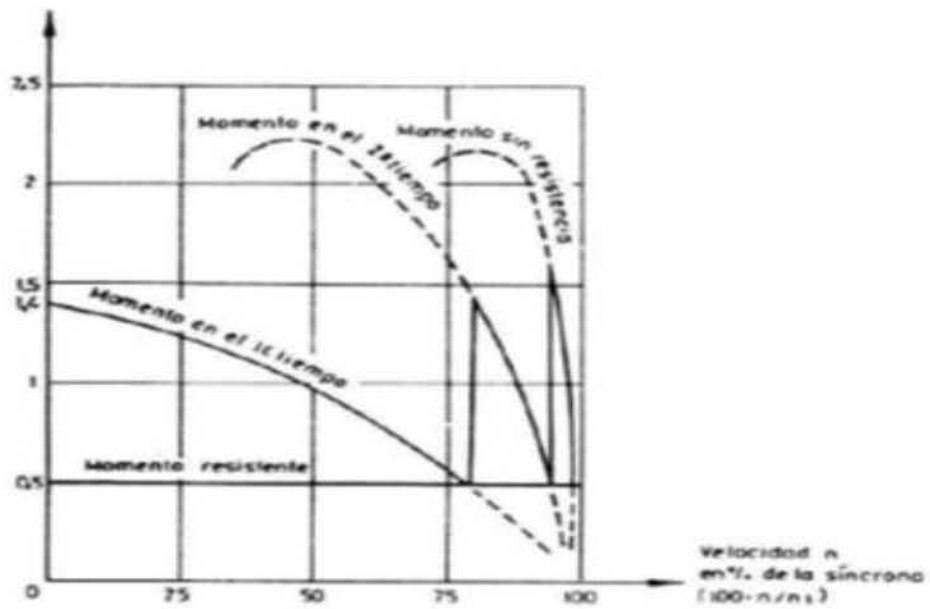
- | | | | |
|-----|---------------------------------|---------|-------------------------------------|
| F1 | Cortacircuito fusible principal | K3M | Contactador final |
| F2 | Relé térmico de protección | M1 | Motor con rotor de anillos rozantes |
| K1M | Contactador línea | R1A-R2A | Resistencias de arranque |
| K2M | Contactador primer punto | | |

Fig. 2.33 Circuito principal de arrancador rotorico de resistencias en 3 etapas.



A

en veces el valor
nominal (M/M_n)



B

Fig. 2.34 A) característica Intensidad-velocidad, B) Momento-velocidad en un arranque rotorico de resistencias en 3 etapas.



Tipos de arranque	% de In en el arranque	Intensidad de arranque	% de par respecto al arranque directo	Escalones de arranque	Numero de hilos al motor	Cortes de corriente en el arranque
1.Directo	100%	6 In	100%	1	3	No
2.Estrella-triángulo (λ - Δ)	33%	1,65 In	33%	2	6	Si
3.Resistencias estatoricas	58÷70%	3÷3,5 In	33÷49%	3 ó 2	3	No
4.Resistencias rotoricas	65%	3,25 In	48%	2	6	No
5.Autotransformador	30÷42 ó 64%	1,5÷2,1 ó 3,2 In	30÷42 ó 64%	4, 3 ó 2	3	No
6.arrancadores estáticos	80%	Variable ~ 4,5 In	64%	Progresivo	3	No

Comparación entre los diversos tipos de arranque.

Tabla 4

ARRANCADORES ESTATICOS

El arrancador estático consiste básicamente en un convertidor estático, alterna, generalmente transistores, que permiten el arranque de motores de c.a. con aplicación progresiva de tensión con la consiguiente limitación de corriente y par de arranque.

El arrancador estático puede dividirse en dos partes bien concretas y definidas, como son el circuito de potencia, tiristores y el circuito de maniobra y regulación de los tiristores.

Al poner en servicio el equipo, los tiristores dejan pasar corriente que alimenta al motor de acuerdo con la programación realizada sobre el circuito de maniobra, que ira progresivamente aumentando hasta alcanzar los valores nominales de la tensión de servicio.

La posibilidad de arranque progresivo también puede darse en sentido contrario durante la fase de parada, de tal manera que se vaya reduciendo la tensión a un 60% aproximadamente del valor nominal, y en ese momento hace el paro.

El paro regulado permite en máquinas concretas como son las bombas en general, reducir el golpe de ariete que se produce en el caso de hacer un paro brusco.

Generalmente el arranque de un motor con arrancador estático no se inicia desde cero, sino que se parte de un valor mínimo de aproximadamente el 33% del valor nominal o de otro mayor, según el tipo de motor y de arranque que se trate.

Este sistema de arranque ofrece una serie de ventajas como son algunas de las que se citan a continuación:



No tiene elementos móviles, ni contactos, como es el caso de los contactores.
Permite arranques suaves, sin transiciones o saltos.
Limitación de la corriente de arranque.
Posibilidad de ajustar en tiempo la rampa de aceleración del motor.
Ahorrar energía cuando el motor funcione parcialmente cargado, con acción directa sobre el factor de potencia ($\cos\phi$).
Detectar y controlar la falta de fase a la entrada y la salida del equipo.
Control directo por autómatas o microprocesador, sobre el arranque y marcha del motor.
Mejor rendimiento del motor.
El equipo no tiene limitación en cuanto al número de arranques, como sucede con la vida de los contactos.

2.3.2 El autotransformador.

En algunas ocasiones es deseable cambiar los niveles de voltaje únicamente en una pequeña cantidad. Por ejemplo, puede necesitarse cambiar el voltaje de 110 a 120 V o de 13.2 a 13.8 kV. Estos pequeños incrementos pueden ser necesarios debido a las caídas de voltaje que ocurren en sistemas de potencia alejados de los generadores. En estas circunstancias, es demasiado costoso elaborar un transformador con dos devanados completos independientes dimensionados para casi el mismo voltaje. En su lugar, se utiliza un transformador especial llamado *autotransformador*.

En la fig.2.35 se muestra un diagrama de un autotransformador elevador. En la fig.2.35a, las dos bobinas del transformador se muestran de manera convencional. En la fig.2.35b, el primer devanado se muestra conectado en forma aditiva al segundo. Ahora, la relación entre el voltaje del devanado primario y el voltaje del devanado secundario está dado por la relación de vueltas del transformador. Sin embargo, *en la salida del transformador, el voltaje completo es la suma del voltaje en el primer devanado y el voltaje en el segundo devanado*. El primer devanado se denomina *devanado común* debido a que su voltaje aparece en ambos lados del transformador. El devanado más pequeño se denomina *devanado serie* porque está conectado en serie con el devanado común.

La fig.2.36 muestra el diagrama de un autotransformador reductor. Aquí, el voltaje de entrada es la suma de los voltajes de los devanados serie y común, mientras que el voltaje de salida es justamente el voltaje del devanado común.

Debido a que las bobinas de los autotransformadores están físicamente conectadas, para el autotransformador se utiliza terminología diferente de la de los otros tipos de transformadores. El voltaje del devanado común se llama *voltaje común* V_C , y la corriente en este devanado se llama *corriente común*. El voltaje del devanado serie se llama *voltaje serie* V_{SE} y la corriente en este devanado se llama *corriente serie* I_{SE} . El voltaje y la corriente del lado de bajo voltaje del transformador son llamados V_L e I_L , respectivamente, mientras que las cantidades correspondientes al lado de alto voltaje del transformador son llamados V_H e I_H . El lado primario del autotransformador (el lado por el cual entra la potencia) puede ser



el de alto o el de bajo voltaje dependiendo de si el autotransformador actúa como reductor o como elevador. De la fig.2.35b, los voltajes y las corrientes de las bobinas se relacionan por las ecuaciones

$$\frac{V_C}{V_{SE}} = \frac{N_C}{N_{SE}}$$

$$N_C I_C = N_{SE} I_{SE}$$

Los voltajes de los devanados se relacionan con los voltajes de los terminales mediante las ecuaciones

$$V_L = V_C$$

$$V_H = V_C + V_{SE}$$

Y las corrientes de los devanados se relacionan con las corrientes de los terminales mediante las ecuaciones

$$I_L = I_C + I_{SE}$$

$$I_H = I_{SE}$$

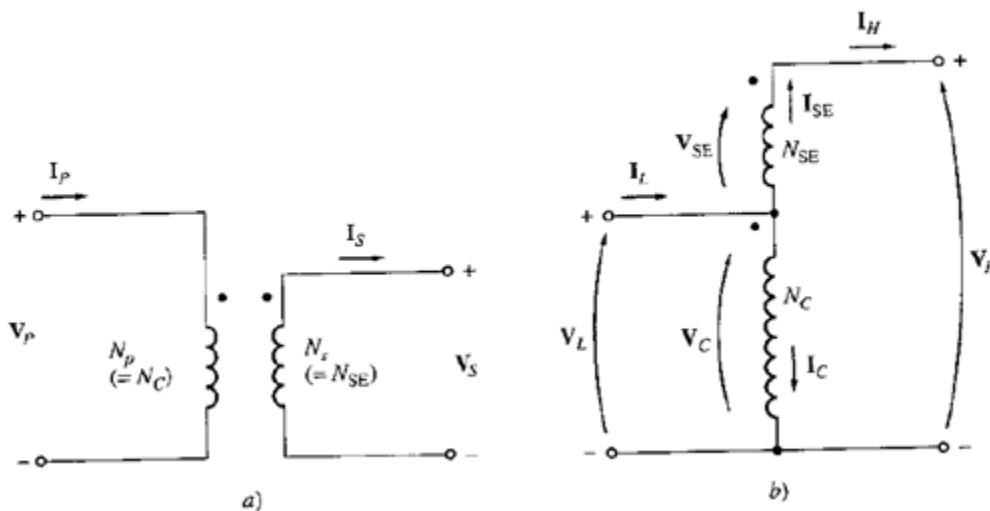


Fig. 2.35 Transformador con sus devanados. a) Conectados de manera convencional. b) Conectados como autotransformador.



Relaciones de voltajes y corrientes en un autotransformador

¿Cuál es la relación de voltajes entre los dos lados de un autotransformador? Es muy fácil determinar las relaciones entre V_H y V_L . El voltaje en el lado de alta tensión del autotransformador está dado por

$$V_H = V_C + V_{SE}$$

Pero $V_C/V_{SE} = N_C/N_{SE}$, entonces

$$V_H = V_C + \frac{N_{SE}}{N_C} V_C$$

Finalmente, teniendo en cuenta que $V_L = V_C$, se obtiene

$$V_H = V_L + \frac{N_{SE}}{N_C} V_L$$

$$= \frac{N_{SE} + N_C}{N_C} V_L$$

$$\frac{V_L}{V_H} = \frac{N_C}{N_{SE} + N_C}$$

Las relaciones de corriente entre los dos lados del autotransformador se pueden encontrar teniendo en cuenta que

$$I_L = I_C + I_{SE}$$

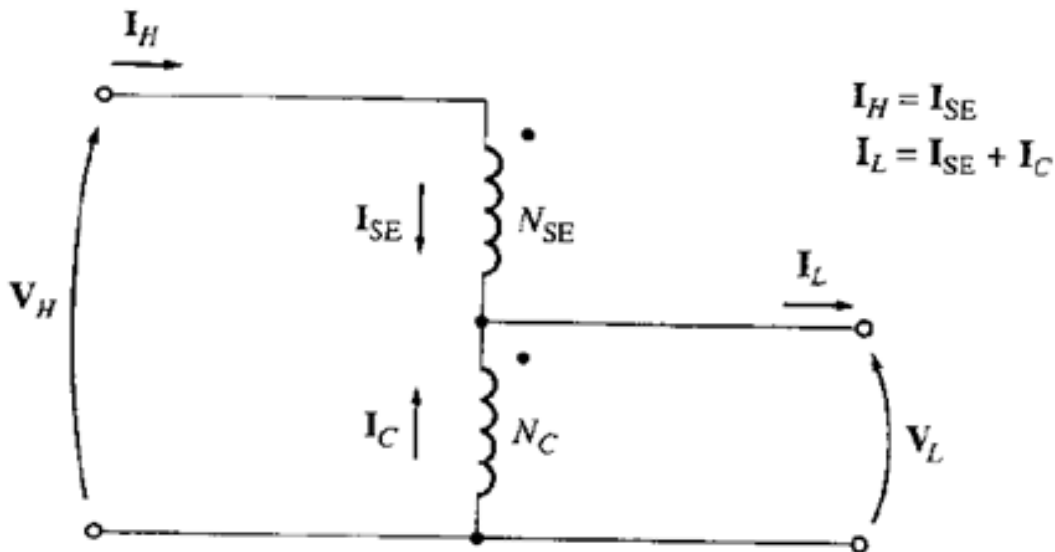


Fig. 2.36 Conexión de un autotransformador reductor.



De la ecuación , $I_C = (N_{SE}/N_C)I_{SE}$, entonces

$$I_L = \frac{N_{SE}}{N_C}I_{SE} + I_{SE}$$

Finalmente, teniendo en cuenta que $I_H = I_{SE}$, se halla que

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{N_{SE}}{N_C}I_H + I_H \\ &= \frac{N_{SE} + N_C}{N_C}I_H \\ \frac{I_L}{I_H} &= \frac{N_{SE} + N_C}{N_C} \end{aligned}$$

Ventaja en el valor nominal de la potencia aparente en los autotransformadores

Es interesante notar que no toda la potencia que pasa del primario al secundario en un autotransformador pasa a través de los devanados. En consecuencia, si un transformador convencional se reconecta como autotransformador, éste puede manejar mucha más potencia que la nominal definida originalmente.

$$S_{in} = V_L I_L$$

Y la potencia aparente de salida está dada por

$$S_{out} = V_H I_H$$

Es fácil demostrar que la potencia aparente de entrada es igual de nuevo a la potencia aparente de salida

$$S_{in} = S_{out} = S_{IO}$$

Donde S_{IO} está definida como las potencias aparente de entrada y de salida del transformador. Sin embargo, la *potencia aparente en los devanados del transformador* es

$$S_W = V_C I_C = V_{SE} I_{SE}$$

La relación entre la potencia que entra al primario (y que sale del secundario) del

$$\begin{aligned} S_W &= V_C I_C \\ &= V_L (I_L - I_H) \\ &= V_L I_L - V_L I_H \end{aligned}$$



Utilizando la ecuación, se obtiene

$$\begin{aligned} S_W &= V_L I_L - V_L I_L \frac{N_C}{N_{SE} + N_C} \\ &= V_L I_L \frac{(N_{SE} + N_C) - N_C}{N_{SE} + N_C} \\ &= S_{IO} \frac{N_{SE}}{N_{SE} + N_C} \end{aligned}$$

Por tanto, la relación entre la potencia aparente en el primario y en el secundario del autotransformador y la potencia aparente real que atraviesa los devanados es

$$\frac{S_{IO}}{S_W} = \frac{N_{SE} + N_C}{N_C}$$

Esta ecuación describe la *ventaja en el valor nominal de potencia aparente* de un autotransformador sobre un transformador convencional. Aquí, S_{IO} es la potencia aparente que entra al primario y sale por el secundario del transformador mientras que S_W , es la potencia aparente real que pasa a través de los devanados del transformador (la restante pasa del primario al secundario sin ser acoplada a través de los devanados del transformador). Nótese que cuanto menor sea el devanado serie, mayor será la ventaja de potencia.

Por ejemplo, un autotransformador de 5000 kVA que conecta un sistema de 110 kV a otro de 138 kVA debería tener una relación de vueltas N_C/N_{SE} , de 110:28. Tal autotransformador debería tener devanados dimensionados para

$$\begin{aligned} S_W &= S_{IO} \frac{N_{SE}}{N_{SE} + N_C} \\ &= (5000kVA) \frac{28}{28 + 110} = 1015kVA \end{aligned}$$

El autotransformador debería tener devanados dimensionados a cerca de 1015 kVA, mientras que el transformador convencional necesitaría devanados dimensionados a 5000 kVA para hacer el mismo trabajo. El autotransformador puede ser cinco veces menor que el transformador convencional y también mucho menos costoso. Por esta razón, es muy ventajoso construir autotransformadores con transformadores entre dos voltajes muy cercanos.

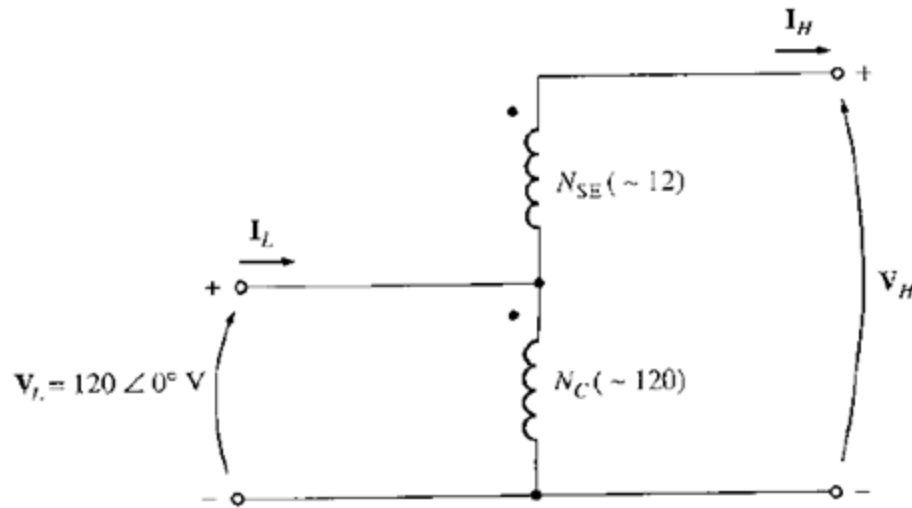


Fig. 2.37 Autotransformador.

Normalmente no es posible reconectar un transformador de tipo convencional como autotransformador, debido al aislamiento del lado de bajo voltaje del transformador común, que podría ser insuficiente para soportar el voltaje de salida de la conexión como autotransformador. En los transformadores construidos específicamente como autotransformadores, el aislamiento del devanado más pequeño (devanado serie) es tan fuerte como el del devanado más grande.

En sistemas de potencia, es una práctica común utilizar autotransformadores siempre que dos voltajes que sean muy cercanos en su nivel necesiten transformarse ya que, cuanto más cercanos sean estos voltajes, mayor es la ventaja en la potencia obtenida del autotransformador. También se utilizan como transformadores variables, donde la toma de baja tensión se mueve hacia arriba y hacia abajo en el devanado. Ésta es una forma muy conveniente de obtener un voltaje ac variable. .

La principal desventaja de los autotransformadores es que, a diferencia de los transformadores corrientes, *hay una conexión física directa entre los circuitos primario y secundario*; de este modo se pierde *el aislamiento eléctrico* de los dos lados. Si una aplicación particular no requiere aislamiento eléctrico, el autotransformador es una forma conveniente y *barata* de ligar voltajes aproximadamente iguales.

Impedancia interna de un autotransformador

Los autotransformadores tienen una desventaja adicional comparada con los transformadores convencionales. Es un hecho que la impedancia efectiva por unidad de un autotransformador, comparada con la de un transformador conectado de manera convencional, es menor en un factor igual al inverso de la ventaja en potencia de la conexión como autotransformador.



La impedancia interna reducida de un transformador, comparada con la del transformador convencional de dos devanados, puede causar graves problemas en algunas aplicaciones que requieran limitar la corriente que fluye durante fallas del sistema de potencia (cortocircuitos). El efecto de la menor impedancia interna provista por un autotransformador debe ser tenido en cuenta en aplicaciones prácticas antes de seleccionar el autotransformador.

2.3.3 Conexión interna de motores.

Motor de fase partida:

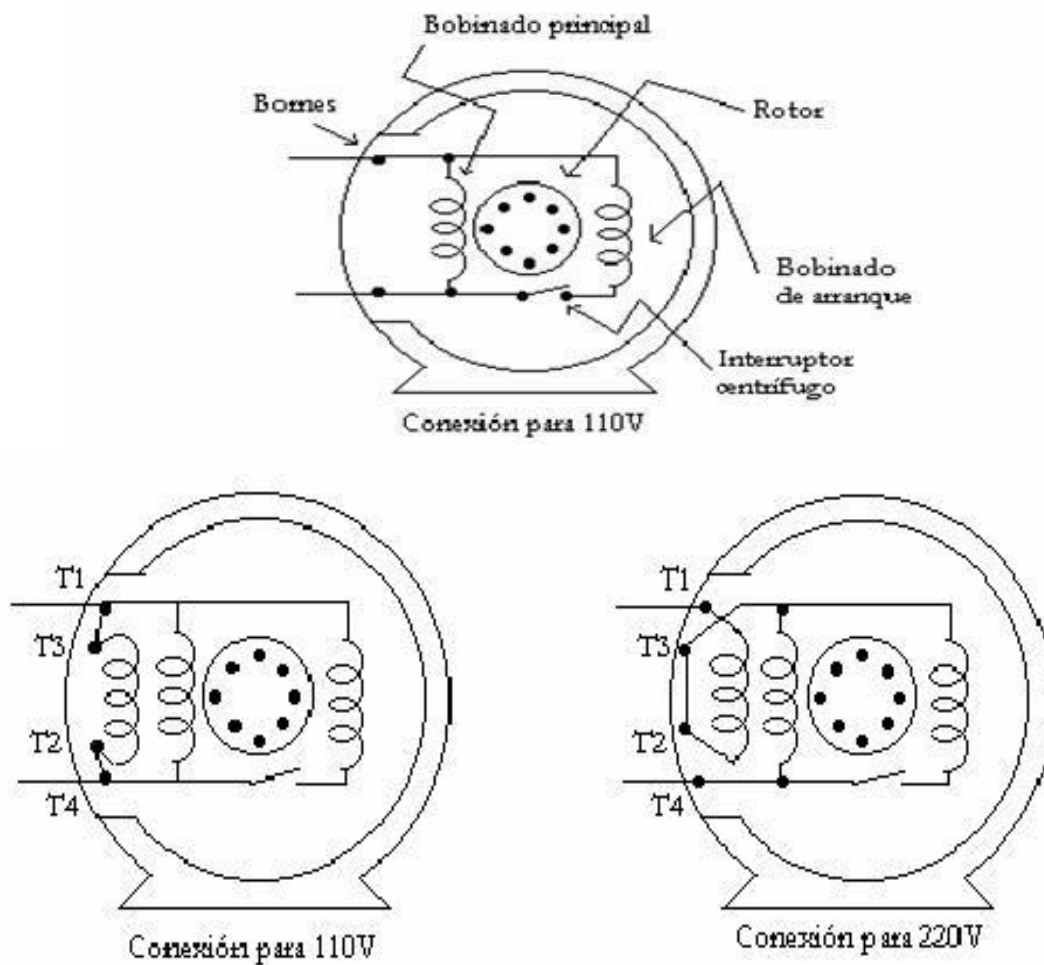


Fig. 2.38 Conexión interna de motor de fase partida.

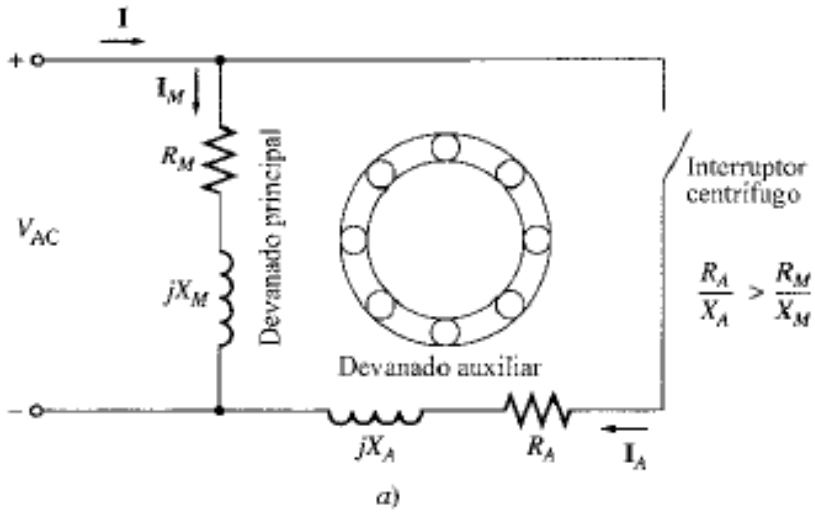


Fig. 2.39 Motor de induccion fase partida.

MOTOR DE ARRANQUE POR CONDENSADOR.

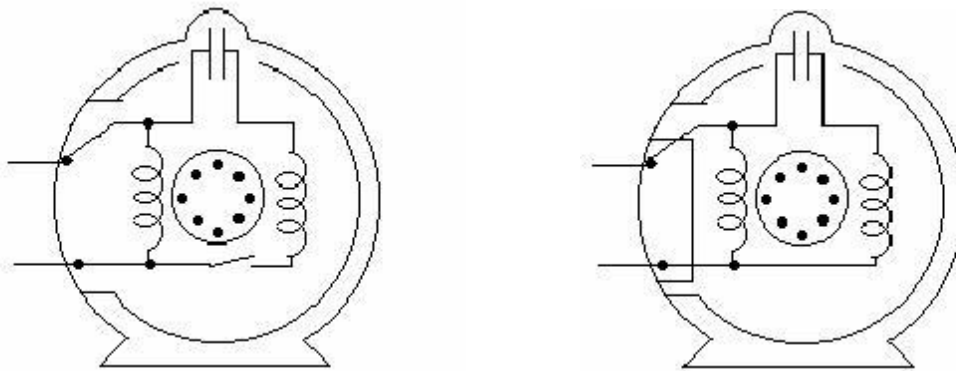


Fig. 2.40 Conexion interna de motor de arranque por condensador.

Motor de induccion jaula de ardilla trifasico.

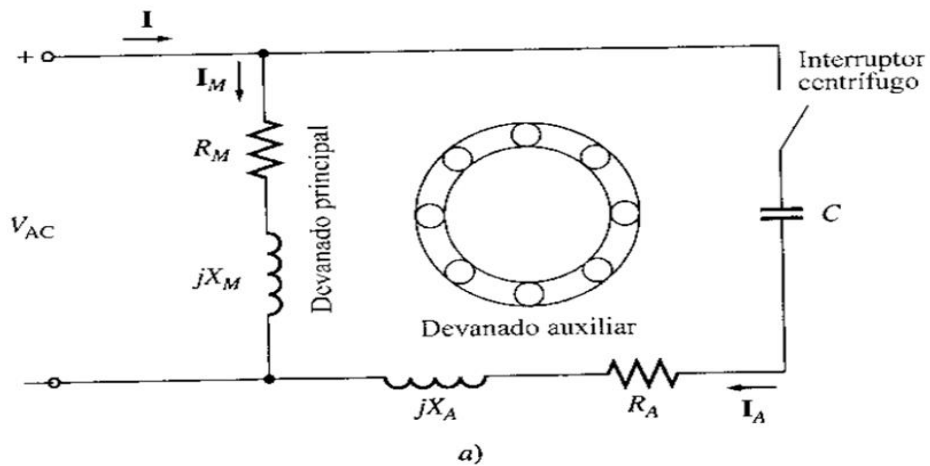


Fig. 2.41 Motor trifásico de inducción jaula de ardilla

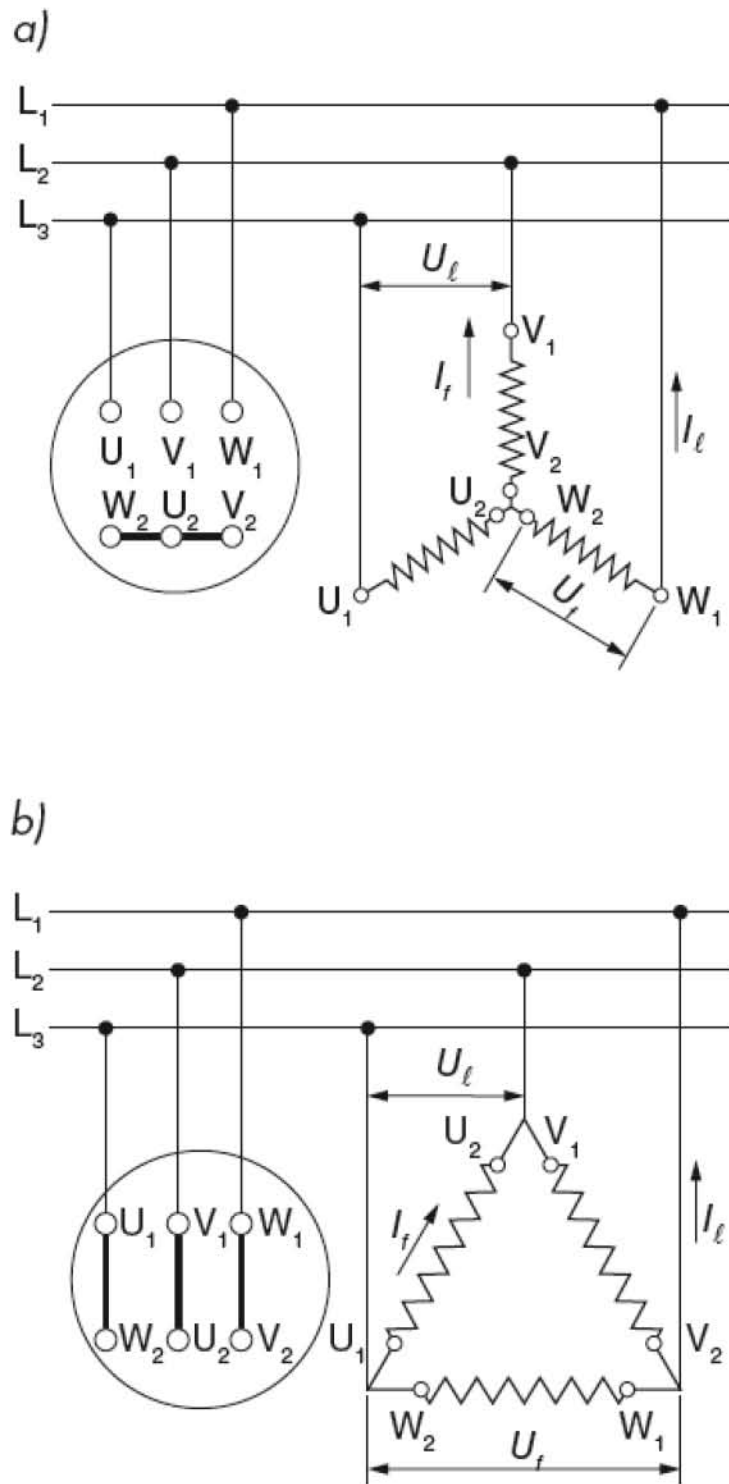


Fig. 2.42. Conexiones en los bobinados trifásicos: a) conexión estrella y b) conexión triángulo.



MOTORES ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS

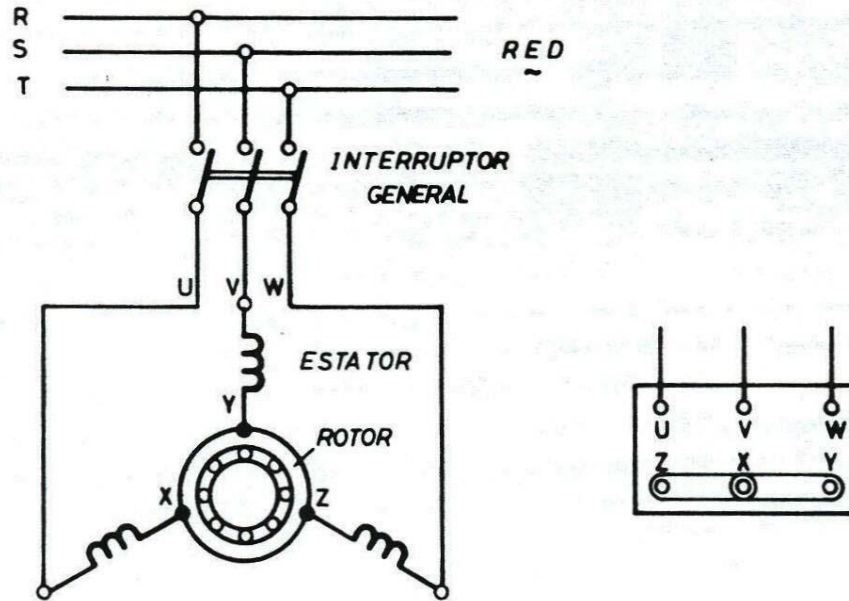


Fig. 2.43 Conexión motor asíncrono trifásico.

Motor universal

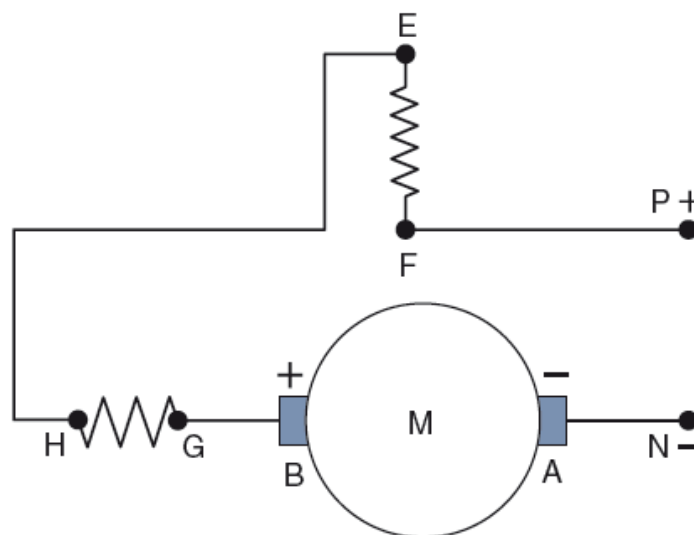


Fig. 2.44 Esquema de conexiones del motor universal.



Motor de fase dividida permanente.

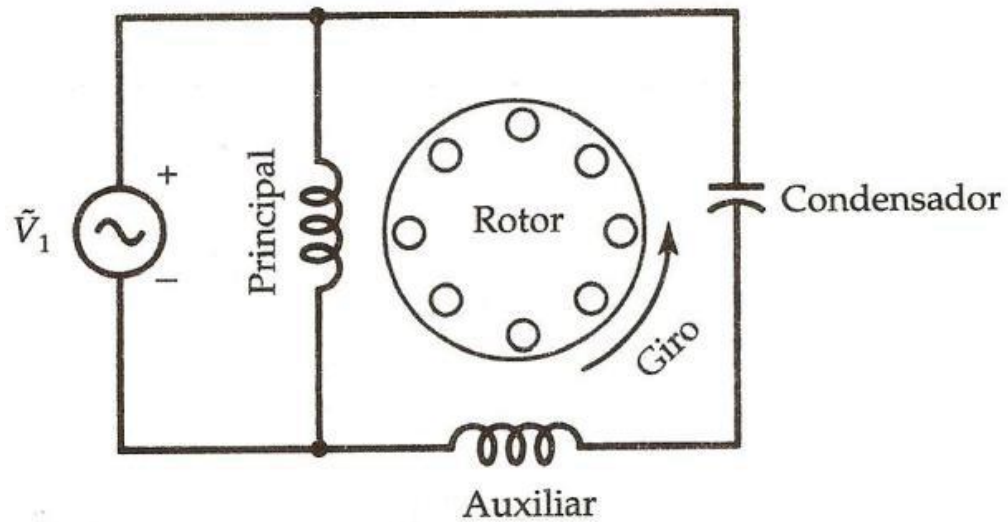


Fig. 2.45 Representación esquemática del motor.

Motor de polos sombreados.

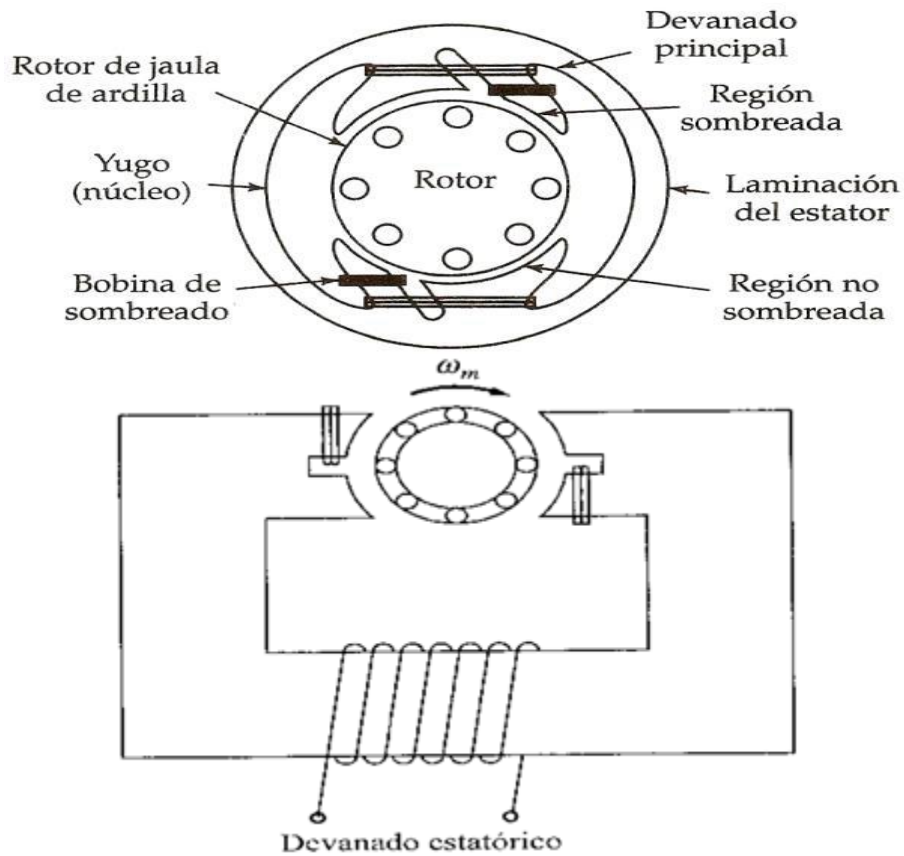


Fig. 2.46 Motor de inducción de polos sombreados.



2.4.1 Criterios a considerar para una adecuada selección de un motor trifásico de inducción.

Introducción

En la primera columna se menciona la variable o aspecto que se debe tomar en cuenta en la selección; en la segunda columna, se presenta el porcentaje de los ingenieros que consideran importante incluir ese aspecto para la compra o adquisición del equipo; y en la tercera columna, se incluye el porcentaje de los ingenieros que no lo considera o podría no conocerlo.

Aspecto	Si lo consideran	No lo consideran
1. Potencia mecánica	98,6%	1,4%
2. Voltaje-frecuencia	90%	17%
3. Rpm	82,9%	17,1%
4. Ambiente de operación	32,9%	67,1%
5. Tipo de carcasa	30%	70%
6. Carcasa o marco	27,1%	72,9%
7. Eficiencia	25,7%	74,3%
8. Uso del variador	21,4%	78,6%
9. Factor de servicio	21,4%	78,6%
10. Tipo de aislamiento	20%	80%
11. Tipo de carga	18,6%	81,4%
12. Tipo de montaje	15,7%	84,3%
13. Tipo de servicio	11,4%	88,6%
14. Tipo de arranque	11,4%	88,6%
15. Marca	11,4%	88,6%
16. Corriente de línea	11,4%	88,6%
17. Temperatura	10%	90%
18. Factor de potencia	8,6%	91,4%
19. Costo	5,7%	94,3%
20. Tipo de enfriamiento	4,3%	95,7%
21. Conexiones	4,3%	95,7%
22. Respaldo-técnico	2,9%	97,1%
23. Tipo roles	1,4%	98,6%
24. Ruido	1,4%	98,6%
25. Altitud	1,4%	98,6%

Tabla 5

En la tabla 5, se observa que los tres primeros aspectos predominan en la selección del motor:

- Potencia del motor (98.6%).
- Velocidad del Motor (90%).



- Voltaje y frecuencia (82,9%).

Se debe indicar que estos aspectos son vitales en la selección adecuada de los motores eléctricos, sin embargo, no pueden ser los únicos, especialmente si se pretende, a mediano y largo plazo, alcanzar la vida útil esperada de estos equipos para garantizar la máxima cantidad de horas de operación antes de su primera falla.

A continuación se hará una breve mención de los aspectos técnicos más relevantes para seleccionar los motores eléctricos, considerando otros elementos que pueden contribuir a la reducción de fallas en estos equipos.

Potencia del motor

Este dato puede indicarse tanto en unidades de Hp o kW, y son aspectos propios de la norma de fabricación (NEMA, IEC). Este valor representa la potencia mecánica de salida, dato que se indica en la placa del motor y corresponde a un valor nominal. La potencia de placa se define como la potencia nominal mecánica que debe o puede ser desarrollada por el motor eléctrico operando a voltaje y frecuencia nominal. Nominal quiere decir el valor máximo que puede alcanzar el motor *“operando a condiciones nominales”*, esto significa que, a menos que el voltaje y la frecuencia no sean los adecuados, pueden no darse condiciones mínimas que garanticen la potencia nominal. Además, es importante recalcar que la potencia en el eje debe ser exigida por la carga (ventilador, bomba, etc), de lo contrario, solo entregaría lo que sea requerido o demandado.

La **potencia mecánica** desarrollada por el motor se obtiene del torque mecánico desarrollado (demandado por la carga) y de la velocidad mecánica de operación a la condición dada, según se observa en la Ecuación.

$$P = \tau \cdot \omega$$

P: representa la potencia mecánica (W)

τ : torque en eje (N-m)

ω : Velocidad mecánica (rad/s)

Para que el motor opere a potencia nominal, la carga demandada debe exigir al motor el torque nominal, y, además, que la velocidad mecánica sea la nominal, por ende, si estos factores no se cumplen, la potencia nominal no será alcanzada, sin embargo el motor puede operar con una capacidad menor o mayor de la indicada. No obstante, la condición crítica ocurre cuando se supera los límites mínimos establecidos por esta máquina, lo que causa una condición de sobrecarga, la cual representa el 16% de las fallas de estos motores.

Debe acotarse, además, que ésta variable está íntimamente ligada a la eficiencia del motor. En el estándar NEMA MG10- 2001 (R2007), se indica que *“La operación de un motor eléctrico fuera de las condiciones nominales de tensión y frecuencia puede disminuir la eficiencia y el factor de potencia, así como afectar negativamente a otras características de rendimiento”*, y a medida que el motor opere a plena carga o cercana a ella, presentará su mayor eficiencia (siempre que se respete el voltaje y la frecuencia nominal).

Para contar con datos o variables técnicas que permitan conocer el porcentaje de



carga del motor, se puede recurrir al estudio del modelo matemático de un motor de inducción, en el cual se tiende a emplear el valor del deslizamiento (s). Nótese en la sig. Ecuación que la estimación de la carga en el eje, siempre y cuando se opera en la curva de bajo deslizamiento, comprendida entre velocidad en vacío hasta velocidad a plena carga.

$$s(\%) = \frac{n_{sin} - n_{mec}}{n_{sin}} \times 100$$

Dónde:

n_{sin} Representa la velocidad sincrónica.

n_{mec} Representa la velocidad mecánica.

Este valor representa la relación entre la velocidad sincrónica y velocidad mecánica. A partir de su valor, se puede estimar el porcentaje de carga al cual opera el motor.

En primer lugar, debe conocerse el valor de la velocidad sincrónica, cuyo dato se deduce a partir de la velocidad mecánica de placa (nominal).

Polos	Velocidad mecánica *	Velocidad sincrónica
2	3500 rpm	3600 rpm
4	1750 rpm	1800 rpm
6	1100 rpm	1200 rpm

Tabla 6. Velocidad sincrónica, velocidad mecánica en función del número de polos.

- La velocidad mecánica nominal varía de acuerdo con el diseño del rotor del motor, representado mediante el deslizamiento.

Se debe explicar que con el valor de la velocidad mecánica de placa y su respectiva sincrónica, se calcula el máximo deslizamiento al que debe operar el motor (respetando el voltaje y frecuencia nominal), y al comparar con el deslizamiento en vacío (mediante la velocidad mecánica en vacío) se puede obtener los porcentajes de carga desde cero hasta plena carga mediante interpolación (valores aproximados).

Se resume que, a pesar de conocer bien el concepto de potencia nominal, realmente este depende del torque o la fuerza de giro que la carga requiera (bomba, ventilador, compresor, etc), pero considerando la velocidad a la cual opera. Por ejemplo, cuando se hace uso de variadores, estos aspectos deben analizarse con detenimiento.

Si existen disparos frecuentes de las protecciones por sobrecarga térmica en el motor, y en especial si esta se debe a mayor corriente de operación (al descartar previamente otros aspectos que puedan provocar el disparo, como alta temperatura del medio, problemas de armónicos, fallo en la protección, etc.), se recomienda considerar si la sobrecarga que puede estar experimentando el motor se deba a modificaciones de alguna de estas variables.

Debe mencionarse que un 1,4% de los ingenieros no considera importante la potencia y argumenta que esto solo se puede conocer al someterlo a la carga.

Este aspecto es una llamada de atención, y debe servir para reflexionar sobre el tipo de formación que se brinda a los futuros ingenieros, asimismo, debe ser considerado por las instituciones responsables de la capacitación de los



profesionales afines a la temática.

Velocidad mecánica

Al igual que el dato anterior, este valor se indica en la placa, la cual representa también un valor nominal, y se expresa en revoluciones por minuto (rpm). La velocidad de rotación del eje de un motor es también conocida como velocidad mecánica. Este valor puede compararse con la velocidad real (si recibe voltaje y frecuencia nominal) sólo en caso de ser iguales (opera a velocidad nominal), y afirmar que el motor opera a carga nominal (plena carga), por lo que se considera un motor en estado normal de operación, de lo contrario, una velocidad real menor que la nominal puede provocar una sobrecarga y viceversa.

Si un motor opera en condiciones nominales de voltaje y frecuencia, pero el valor de la velocidad mecánica (en una determinada condición) es menor o mayor que la nominal, se deduce que el torque que demanda por la carga no es nominal.

Se puede afirmar que la velocidad mecánica y el torque de carga son inversos (a mayor carga en el eje, menor velocidad mecánica y viceversa), siempre y cuando se trate de un motor de inducción de potencia constante, a diferencia de un motor de torque constante y un motor de torque variable, que presentan otro comportamiento.

Para una aplicación dada, al analizar la velocidad de placa del motor como aspecto de selección, debe recordarse que no será a esta velocidad que gire necesariamente el eje, pues deben cumplirse las tres condiciones anteriores (voltaje, frecuencia y carga nominal).

Al considerar este aspecto, se deben tener claros las condiciones en que operará el motor para satisfacer las necesidades, pues de acuerdo con el tipo de aplicación analizado, el motor debe girar a la velocidad de placa (o valor fijo), pero es posible que el torque que exige la carga no sea constante ni nominal, lo que implicaría recurrir a métodos de control de velocidad tradicionales o emplear métodos modernos (variador de frecuencia), lo cual requeriría un mayor análisis para considerar si el diseño de la máquina permite flexibilidad de velocidades.

El 82,9% de los ingenieros considera que la velocidad es un factor importante al seleccionar los motores eléctricos, sin embargo, el 17,1% restante considera que la velocidad no es tan importante y que puede corregirse con un variador de frecuencia.

Uno de los ingenieros entrevistados explicó, a modo de ejemplo, por qué la velocidad ya no es un factor determinante. Comentó que, al comprar un motor trifásico de inducción (3500 rpm) que debía manipular una bomba centrífuga, el producto trasegado presentó inconvenientes de derrames de producto (salpicaduras), por lo cual, fue necesario consultar al fabricante de la bomba.

Como recomendación del fabricante, se sugirió operarla a 1800 rpm. El ingeniero a cargo decidió emplear una solución moderna mediante el uso de un variador de frecuencia, configurado para que opere al 50% de la frecuencia nominal, y de esta forma solucionar el problema.

Aunque este dispositivo posee otras funciones, actualmente su operación se limita a una reducción fija de la velocidad mecánica.



Se evidencia una mala selección del motor, ya que se debió adquirir un motor de 4 polos para alcanzar el mismo resultado. O bien, se justifica el uso del variador si también se configura para la optimización de la energía eléctrica mediante la regulación del caudal trasegado de acuerdo a la demanda, pero lamentablemente este no es el caso.

En resumen, no solamente se cometió el error de seleccionar una velocidad inadecuada, sino que el costo de la instalación del equipo se incrementó. Aunado a ello, el uso del variador accionado a un motor con un aislamiento convencional puede provocar, con el tiempo, el deterioro prematuro del aislamiento, ya que, al girar el motor a menor velocidad, se reduce su enfriamiento. Para evitar el daño, se recomienda la reducción de potencia mecánica en busca de un menor consumo de corriente que, a su vez, genera una menor temperatura del devanado.

Voltaje y frecuencia

También son valores nominales o datos de placa. Se emplean como unidad de medida los voltios y los herz, respectivamente. El voltaje representa el valor de la tensión que debe recibir el motor según el diseño del fabricante; la frecuencia representa la frecuencia eléctrica de la fuente de alimentación del voltaje aplicado. Al seleccionar un motor, se debe tener claridad que, aunque la placa permite (para algunos motores) operar en cierto rango, p.e. 208 V- 230 V, la mejor condición para operación se obtiene al mayor voltaje, por lo tanto, debe obtenerse un motor que opere al mismo voltaje disponible en la red donde será alimentado el equipo. Si no se contempla este aspecto, es posible que al motor siempre se le exija las mismas capacidades de nominales, pero sin garantizarle las condiciones adecuadas.

Esto significa que, se debe exigir mayor corriente para manejar la misma carga, o la velocidad de operación será menor que la esperada.

El voltaje y la frecuencia se relacionan directamente con el flujo magnético de la máquina, como se observa en la

Ecuación:

$$flujo(\phi) = \frac{Voltaje}{Frecuencia}$$

Como se puede deducir de la ecuación anterior, el flujo magnético depende directamente del voltaje aplicado; si se reduce en el voltaje, se da una reducción en el flujo magnético o, por el contrario, pequeñas reducciones de la frecuencia (para voltaje constante) provocan aumentos de flujo magnético.

Se aclara que, aunque pequeños cambios en el voltaje o la frecuencia pueden producir un flujo mayor que el nominal, y aunque el motor desarrolle mayor torque, también experimenta una mayor temperatura y, por ende, un deterioro prematuro del aislamiento de los devanados. Aunque la red de alimentación debe operar con la mayor estabilidad posible, la realidad presenta algunas diferencias. Debería considerarse un motor con factor de servicio (factor de sobrecarga) para solventar los posibles incrementos de flujo magnético que, aunque no dañan el motor a corto plazo, éste sí experimenta un deterioro prematuro, lo cual fomenta las fallas de estos equipos (bajo aislamiento puede provocar un corto interno de bobina, un



corto a tierra, un corto a masa, etc.).

El 84% considera que el voltaje es un factor importante en la selección del motor, pero el restante considera que esto se puede corregir con la instalación de otros equipos (más costo), aspecto que no favorece la optimización de los recursos, componente importante en ingeniería.

Estos tres aspectos son los factores o variables técnicas que comúnmente se consideran en la selección de un motor eléctrico.

Los otros aspectos no mencionados hasta el momento, incluidos en la tabla 5, y que inciden directamente sobre las fallas de motores, se expondrán a continuación (los que no repercutan sobre las fallas no se analizarán).

Otros aspectos a considerar

A continuación se hará mención de otros aspectos que no siempre cuentan con la importancia necesaria al momento de la selección de un motor eléctrico, pero que inciden en la prevención de las fallas.

Gracias al estudio realizado se conocieron las principales fallas en los motores eléctricos y, a partir de esta información, se establecieron cuáles son las variables que repercuten o inciden de forma directa en las fallas de motores.

Los aspectos que se analizarán son: el ambiente de operación, el tipo de carcasa o envoltura, la carcasa (FRAME), el uso de variador de frecuencia, el factor de servicio, el tipo de aislamiento, el montaje, el tipo de servicio, la temperatura ambiente y la altitud. Por lo observado en las industrias visitadas, los diez aspectos anteriores deben ser igual de importantes que la potencia, voltaje y velocidad en la selección del motor, aunque en la tabla 5 menos del 33% los considera relevantes. Esto no implica que todos los motores se seleccionen para condiciones críticas, pero por lo menos estos factores deben ser considerados conscientemente antes de ser descartados del todo, o al menos se debe tener la noción de su influencia en la aplicación dada.

Ambiente de operación

El ambiente de operación contempla todos los aspectos del medio externo al cual se somete el motor eléctrico y las características del diseño del motor que lo protege, los cuales pueden tener un efecto desfavorable en la máquina si el diseño no es el adecuado para soportar las condiciones adversas a su operación.

En la selección del motor, se deben analizar, al menos, cuatro datos de placa del motor, los cuales están íntimamente ligados a las condiciones externas de trabajo, asimismo el fabricante debe indicar el funcionamiento del motor de acuerdo a su diseño.

Si estos aspectos no se analizan, o se exceden las condiciones de su diseño, es posible que se dé un daño prematuro a sus componentes. Si estas variables se desconocen, o no se controlan los límites máximos permitidos por el fabricante, se generan una causa directa de falla.

De la tabla 5, se desprende que el 32,9% estima importante considerar las condiciones externas a las cuales se somete el motor a la hora de seleccionar el equipo.

A continuación, se describen estos cuatro aspectos, a saber: temperatura de trabajo, tipo o clase de aislamiento, tipo o grado de encerramiento (protección al



medio) y altura sobre nivel del mar.

La temperatura de trabajo (AMBIENT)

Es la temperatura ambiente máxima (°C) a la cual el motor puede desarrollar su potencia nominal sin peligro. Es la temperatura del aire circundante que entra en contacto con los componentes calientes del aparato.

En la norma NEMA MG 1-2007, sección 7.8, se indica que *“El valor de la temperatura ambiente máxima será de 40 °C, a menos que se especifique otra cosa”*.

Si la temperatura ambiente es mayor a la señalada, todo el sistema de enfriamiento se afecta. Esto se puede observar en el barniz que cubre el conductor eléctrico, el cual permite aislar los hilos de alambre de cada bobina, ya que las propiedades del mismo se deterioran a temperaturas superiores a su diseño. Refiérase a la Norma GM 1-12.58.1, en donde se indica la corrección del porcentaje de carga recomendado por cambios de temperatura.

Es por ello que si el motor se ubica en un ambiente de trabajo a temperaturas altas, por ejemplo, el cuarto de calderas, los hornos, etc., en donde se superen los 40 °C (motores estándar), se debe reducir la potencia de salida del motor para evitar daños prematuros en el sistema de aislamiento, es decir, se debe operar a una corriente menor a su diseño.

El deterioro prematuro del aislamiento puede contribuir, en las zonas de concentración de esfuerzos, a la formación de un cortocircuito entre las espiras del estator; esto se considera una de las principales causas de falla en los motores de inducción [5], debido a que en el arranque y parada de este tipo de máquinas se pueden generar sobretensiones transitorias que posteriormente generan mayor degradación. Además, cuando se da un cortocircuito en una espira o grupo de espiras, la corriente que circula debido a la fuerza electromotriz generada, sólo será limitada por la impedancia entre espiras vecinas, lo que puede ocasionar daños irreversibles. Por esta razón, estas fallas incipientes deben ser detectadas a tiempo, para evitar una catástrofe mayor en los devanados de la máquina. Estas observaciones se logran con la aplicación del análisis espectral del flujo axial de dispersión.

El solo hecho de operar a una temperatura mayor de lo nominal, no ocasiona, directamente, una falla eléctrica, ya que debe considerarse la temperatura final a la cual opera el devanado del motor y conocer si el tipo de aislamiento puede soportar ese valor, aunado a la temperatura que genera la corriente circulante que podría no ser la nominal. Esto puede producir el incremento correspondiente sin el deterioro de sus componentes, no obstante, esto es circunstancial, por lo tanto, en la medida de lo posible, siempre deben prevenirse las condiciones desfavorables para la máquina.

El aumento de temperatura producido en el motor debe ser compensado por:

1. La reducción de la carga y, por consiguiente, las pérdidas por calor del motor. Si el motor posee una temperatura nominal de 40 °C y este opera a 50 °C de temperatura ambiente, podría darse que el motor posea un factor de servicio de 1,15% y que trabaje a la carga nominal, o bien, si el factor de servicio es 1, se puede reducir la potencia nominal en un 90%.



2. Utilizar un motor de diseño especial. Además, se puede mitigar el efecto por medio de rodamientos y la aplicación de grasas especiales que mejoren el sistema de aislamiento.

Para el caso 1, mencionado anteriormente, se trabajará apoyados en el factor de servicio o la reducción de la carga de los datos de placa.

Por otro lado, en el caso 2, las mejoras recaen en el diseño del motor, ya sea mediante el incremento del tamaño de la carcasa, de manera que permita mayor disipación del calor, o bien a partir de motores contra explosión que permitan trabajar a temperaturas mayores que los motores estándar.

En la norma NEMA MG 1, se cita que *“La temperatura de los devanados puede ser medida empleando el método de la Resistencia excepto, en motores de 15 hp o menores, para los cuales la temperatura puede ser medida mediante el método de termocupla”*.

A pesar de que la temperatura externa o la del trabajo de la máquina se debe considerar como parte del ambiente de operación, el 10% de los encuestados lo considera como un aspecto que debe analizarse por separado, según se muestra en la tabla 1.

La clase de aislamiento (INSULATION CLASS)

Se indica la clase de materiales de aislamiento utilizados en el devanado del estator. Son sustancias aislantes que cubren el cobre del conductor y que son sometidas a pruebas para determinar su duración al exponerlas a temperaturas predeterminadas.

En la tabla 7, se detalla la clasificación del aislamiento empleado en los conductores.

Al consultar a dos talleres de reparación de motores⁹ se indicó que las clases F y H son las de mayor aplicación en los motores modernos y de mayor uso en la fabricación y reparación de motores.

Las clases A y B están presentes en la mayoría de motores fabricados antes de 1970, especialmente el tipo A, que se considera obsoleto, aunque es normal encontrar en la industria costarricense motores eléctricos con el aislamiento de Clase A todavía en operación.

La temperatura que se indica en la columna central de la tabla 3, corresponde a la suma de la temperatura ambiente (40 °C) más el incremento permitido (valor de diseño). Por ejemplo, la Clase F sólo permite un incremento de ciento quince grados centígrados (155°C-40°C=115°C), aunque la temperatura ambiente sea de 40°C o menor.

Tipo de aislamiento	Temperatura máxima	Incremento máximo
Clase A	105 °C	65 °C
Clase E	120 °C	80 °C
Clase B	130 °C	90 °C
Clase F	155 °C	115°C
Clase H	180 °C	140°C
Clase N	200 °C	160°C

Tabla 7. Tipos de aislamiento.



Existe una regla aproximada, llamada regla de Montsinger, conocida como la ley de los 10 °C, lo cual significa que, por cada diez grados que se supere la temperatura de diseño de la clase de aislamiento, éste se degrada un 50%, y viceversa.

Por esta razón, es tan importante mantener la temperatura de los devanados o someter al barniz a temperaturas inferiores, pero, para iniciar la prevención, se debe considerar la temperatura del ambiente, ya que no solo podría exigir que el motor supere la temperatura de los 115 °C (para la clase F), sino que limita la capacidad de intercambio de calor con el medio, lo cual dificulta su enfriamiento.

Estos valores indican la máxima temperatura que pueden soportar los conductores del estator sin deteriorar el sistema de aislamiento. Como regla práctica de campo, la temperatura interior del motor (punto más caliente) se puede aproximar a la temperatura externa (carcasa) y sumar de 15 a 20 °C (dato aproximado empírico). Este valor permite conocer si el barniz del conductor de los devanados se encuentra expuesto a una temperatura mayor según su diseño. Para un dato más exacto, se aconseja emplear una termocupla en su interior, de manera que permita crear un registro o historial de su comportamiento.

Es importante indicar que el 20% de los ingenieros considera relevante conocer el tipo de aislamiento de la máquina que se va a comprar, lo cual refleja que el 80% desconoce la importancia de este aspecto, o bien, tiene poco interés en identificar los límites de operación de los equipos.

Tipo de protección al medio (ENCL)

Para los motores fabricados en la norma NEMA10, se definen:

- **ODP** (Open Drip Proof): motor abierto que posee aberturas para la ventilación, construidas de tal forma que el éxito de la operación no se interfiere con gotas de líquido a partículas sólidas que entren al recinto con un ángulo de 0 a 15 grados con la vertical.
- **TE** (Totally Enclosed): un motor totalmente cerrado que impide el libre intercambio de aire entre el interior y el exterior, pero no lo suficientemente cerrado para impedir que sea impermeable al aire.
- **TEFC** (Totally Enclosed Fan Cooled): motor totalmente cerrado enfriado con ventilador, equipado para la refrigeración exterior, por medio de un ventilador integrado al motor, pero externo a sus partes.
- **TENV** (Totally Enclosed Non Ventilated): motor totalmente cerrado que no está equipado para refrigerarse por medios externos adjuntados a sus partes.
- **TEFCG** (Totally Enclosed Fan-Cooled Guarded Motor): motor totalmente cerrado enfriado con ventilador, donde todas las aberturas poseen acceso directo al ventilador, sólo limitado por el tamaño, diseño estructural o por las parrillas, a fin de evitar el contacto accidental con el ventilador.

Estas aberturas no permiten el paso de elementos mayores a $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro.

El diseño de la carcasa, representado mediante los códigos anteriores, permiten conocer el grado de protección al cual puede estar sometido el motor, por ejemplo, en condiciones muy húmedas (mucho lavado u otro) y contaminantes (polvo, virutas, desecho del proceso).



La clase de protección representa las características del envolvente, donde al menos se indique que:

- protege a las personas contra el peligro de tocar directamente partes móviles o que estén en contacto con tensiones de baja tensión, esto se denomina protección contra contactos directos;
- protege la máquina contra la entrada de objetos extraños, líquidos o sólidos desde el medio ambiente exterior;
- protege la máquina contra choques mecánicos, factor que se omite en la mayoría de los casos.

En algunas empresas especialmente el sector alimenticio, que por su proceso se requiere de limpieza y lavado constante, se aconseja emplear motores eléctricos washdown (lavables) que son una sub categoría de los TEFC, especialmente en zonas de proceso productivo que presenten condiciones de mucha humedad y contaminación.

El costo de un motor cerrado es mayor, sin embargo, si se considera como una inversión a mediano plazo, y se toma en cuenta el efecto de menor incidencia de falla por humedad o bajo aislamiento, es posible permitir la recuperación de la inversión.

Algunas empresas distribuidoras de marcas de motores reconocidas, sólo importan y distribuyen hoy en día motores cerrados (sellados), lo cual puede contribuir con la prevención forzada de fallas; sin embargo, se da la compra de sistemas o equipos que incluyen motores eléctricos, los cuales podrían no estar diseñados o seleccionados correctamente para las condiciones en las que operan en la industria nacional.

El 30% de los ingenieros define al motor cerrado como el tipo de carcasa que se debe seleccionar para proteger al equipo del medio en donde opera.

Altura sobre el nivel del mar

Sólo si la ubicación de la instalación del equipo es superior a los 1000 metros sobre el nivel del mar (msnm), se debe considerar este aspecto.

En el efecto de enfriamiento mediante la refrigeración, el aire está en función de su densidad. La presión atmosférica y la densidad del aire se reducen a altitudes mayores a los 1000 msnm, lo que provoca que la disipación de calor del motor se reduzca, y que, por ende, la máquina se caliente más. Como guía general, por cada 100 metros por encima de los 1000 metros, la temperatura aumenta 1%.

Para mantener el calentamiento del motor dentro de límites seguros a causa de altitudes mayores a los 1000 msnm, existen varias alternativas.

Si se cuenta con un motor estándar pueden aplicarse las siguientes medidas:

- Que opere a menor carga o emplee un factor de servicio de 1,15 o superior, lo que permite operar el motor cerca de 2700 msnm (9000 pies).
- Que el motor funcione a menor temperatura ambiente de diseño (40 °C), lo cual permite que el motor funcione a 2000 msnm cuando la temperatura ambiente máxima es 30 °C o a 3000 msnm cuando la temperatura no excede los 20 °C.

Para altitudes mayores, se recomienda emplear un motor diseñado para tal efecto (p.e. mejor ventilación).

Aunque la máquina opere con menos corriente, la temperatura puede ser igual o mayor de la esperada por la reducción en la eficiencia del sistema de ventilación,



ocasionada por la reducción de la densidad del aire.

Aunque el factor de corrección (reducción) debe aplicarse directamente a la temperatura máxima (incremento) que soporta el tipo de aislamiento, con el tipo de aislamiento F por cada 500 metros por encima de los 1000 metros, se debe reducir en un 5% la temperatura de 115 °C registrada, al ser el máximo incremento que esta clase permite.

Es importante denotar que el 98,6% de los ingenieros no considera este factor importante para la selección de los motores o, peor aún, desconocen que tenga alguna relación.

Carcasa (FRAME)

Se define como el estándar en la designación del tamaño del armazón o carcasa, cuyas dimensiones pueden proporcionarse en milímetros o pulgadas, dependiendo de la norma (IEC, NEMA).

Aunque, en aspectos generales, este dato no posee mucha relación con la prevención de fallas, existe un pequeño detalle a considerar.

Los motores con sufijos TS en el número de FRAME, son motores de eje corto, para los cuales se recomienda acoplar la carga directamente al eje, ya que el diseño de rodamiento del lado de la carga es de bolas; aunque permite la carga radial y la axial, no se recomienda, pues los valores de carga axial son mínimos.

Para estos casos, la carga se debe acoplar directamente. Si por el tipo de aplicación la carga se acopla por medios indirectos (polea, cadena, etc), el rodamiento delantero del lado de la carga deberá soportar un mayor desgaste y esfuerzo axial, por lo que se deberá cambiar el diseño de rodamiento, de lo contrario no se alcanzará la vida útil esperada.

A modo de ejemplo, el FRAME 284 T, presenta un largo de eje de 11,7 cm (4,62") diferencia del FRAME 284 TS cuya dimensión del eje es de 8,25 cm (3,25").

El 27% de los ingenieros consultados considera el marco (FRAME) como aspecto importante en la selección del motor, especialmente por las dimensiones de los hoyos destinados al montaje del mismo, ya que cuando se reemplaza el motor se busca contar con el mismo FRAME que permita emplear la base de montaje anterior.

Tipo de montaje

Al igual que el caso previo, en el Frame se incluye el sufijo V o H, el cual indica la posición del motor; por ejemplo, en el caso del montaje vertical, el rodamiento opuesto a la carga debe soportar el mayor esfuerzo axial, en cambio, el rodamiento cercano a la carga, solo se diseña para mantener la alineación del eje y rotor con el estator.

En ambos casos estos aspectos están relacionados con las fallas mecánicas, producto de daños prematuros en rodamientos y no considerados en la selección del mismo.

Solo el 15,7% de los ingenieros lo considera como factor importante para la selección del motor.

Factor de servicio

Los factores de servicio más comunes son de 1,0 a 1,15. Un factor de servicio de 1,0, por lo general, no se indica en la placa del motor (solo cuando es diferente de uno), lo cual significa que no debe demandarse al motor mayor potencia que la



nominal si se quiere evitar un daño por sobrecarga.

Cuando un motor de inducción funciona con un servicio de factor superior a 1,0, puede tener una eficiencia, un factor de potencia y una velocidad diferentes de los de carga nominal. El torque máximo, torque y corriente de arranque pueden no tener cambios. Aunque el motor opere continuamente, no se recomienda emplear permanentemente el factor de servicio, para evitar la menor esperanza de vida en comparación con las condiciones nominales.

En las aplicaciones que requieren una sobrecarga de la capacidad, se recomienda utilizar un rango mayor de potencia, pero se debe tener cuidado de no exceder la temperatura máxima diseñada para la clase del sistema de aislamiento.

Con uno de 1,15 (o cualquiera mayor de 1,0), el motor puede trabajar hasta una potencia igual a la nominal multiplicada por el factor de servicio, sin que ocurran daños al sistema de aislamiento, siempre y cuando el exceso de carga no sea constante y la temperatura de los devanados no sea superada. Sin embargo, debe tenerse presente que el funcionamiento continuo dentro del intervalo del factor de servicio hará que se reduzca la duración esperada del sistema de aislamiento, lo que causaría el deterioro prematuro de sus componentes.

Al citar el factor de servicio, se indica que el fabricante asegura que el tipo de aislamiento permite, por cierto tiempo, un exceso de carga de potencia según la placa y que este aumento de temperatura (por un corto tiempo) se consideró en su diseño, por lo que no debería provocar deterioro anormal.

Se recomienda usar el factor de servicio cuando el tipo de carga mecánica puede presentar intermitencias propias del proceso, lo cual genera esfuerzos diversos en la máquina, o bien cuando la asignación de la potencia mecánica se ha estimado de forma equivocada y, por ende, se permite este factor de error. También se usa para corregir problemas de altitud, de mayor temperatura externa, etc.

El factor de servicio presenta relación directa con el tipo de servicio. Si es de tipo continuo, el factor de servicio se puede aplicar permanentemente o de forma continua con su respectivo incremento

de corriente de línea, sin embargo, no se recomienda, al igual que el uso pesado o intermitente, el cual permite que el motor se someta a excesos de carga por periodos cortos. Este aspecto se explica a continuación.

El factor de servicio, es un componente que el 21,4% considera en la selección del motor eléctrico. Aunque se asume como un factor de seguridad (someterse a mayores cargas), no siempre se tiene claro realmente en qué se fundamenta el fabricante para garantizar o permitir mayor carga en el motor sin que se dañe.

Tipo de servicio

Este aspecto representa el ciclo de trabajo de un motor, en el que se describe el tiempo energizado/apagado del motor y las variaciones de carga con respecto al tiempo para cualquier aplicación.

En la definición de potencia nominal, se señala que “el valor de la potencia asignada que señala libremente el fabricante en función de la clase de servicio a que se destine la máquina sin que se produzcan calentamientos inadmisibles para la vida de los aislantes”.

El ciclo de aplicaciones pueden dividirse en tres clasificaciones [:



- Continuo:

Es un servicio que requiere que la operación demandada sea con carga constante para un tiempo indefinido, cuando el motor opera las 24 horas.

Esta es la clasificación más común y representa aproximadamente el 90% de las aplicaciones de motor.

- Intermitente: Es cuando la carga exige ciclos o intervalos que alternar con y sin carga, estos valores de tiempos de la máquina detenida y en funcionamiento deben estar claramente definidos.

Al seleccionar un motor para estas aplicaciones, se debe confirmar que los caballos de fuerza coincidan con los requisitos en virtud de la condición de carga.

- Variación de carga: En la norma MG 10-2001 (R2007), se establece que existen aplicaciones donde la carga presenta ciclos de operación que no indican periodicidad, como también, periodos donde la máquina está detenida.

Para este tipo de casos, pueden existir periodos de picos de carga que deben ser considerados mediante el establecimiento de una carga de operación.

La norma NEMA MG 10-2001 establece la cantidad de arranques por hora y el tiempo mínimo entre cada arranque según el número de polos y la potencia, según se muestra en la tabla 8.

HP	2 polos			4 polos		
	A	B	C	A	B	C
2	11,5	2,4	77	23	11	39
10	6,2	11	92	12,5	51	46
20	4,8	21	110	9,6	99	55
25	4,4	26	115	8,8	122	58
30	4,1	31	120	8,2	144	60
50	3,4	46	14	6,8	232	72

Tabla 8. Arranques e intervalos permitidos.

Dónde:

A = máximo número de arranques por hora.

B = máximo producto de arranque por hora por tipo de carga (WK^2).¹⁷

C= tiempo en segundo mínimo entre cada arranque.

Cabe indicar que exceder estos límites representa un comportamiento de sobrecarga térmica, ya que el calor generado por los constantes arranques requiere de tiempos mínimos de enfriamiento, además de ellos, en el cuadro 4, también se incluye la inercia de la carga, factor determinante en el tiempo que tarde el motor en alcanzar su velocidad régimen.

Estos aspectos rara vez son considerados a la hora de operar esta máquina. Además se debe indicar que, si el motor requiere un trabajo mayor al indicado, debería solicitarse un motor especial para estas condiciones. También se puede pensar en el diseño, pero para ello se recomienda analizar la pérdida de eficiencia por operar con una carga menor.

Del cuadro anterior, se entiende claramente el concepto A y C, sin embargo, el punto B debe ampliarse con mayor detalle. Aunque el punto A establece el



máximo número de arranques por hora, el punto B considera la inercia presente en el tipo de carga¹⁸, la cual se especifica mediante wk^2 .

A modo de ejemplo, si se utiliza un motor de 25 hp, 4 polos, con una wk^2 de 50, se necesita confirmar si la cantidad de arranque por hora indicada en la tabla es menor o mayor según la inercia.

De acuerdo con el cuadro A= 8,8 y B= 122. En el nuevo cálculo de arranques por hora se obtiene:

$$\frac{\text{Arranque}}{\text{Hora}} = \frac{122}{50} = 2,44$$

Esto significa que el valor de 8 arranques por hora no será el indicado, ya que, por la inercia del tipo de carga, se recomienda menos de 2 veces por hora.

En la norma NEMA MG 10-2007 sección 1.8.

El valor correspondiente a cada carga se enlista en MG 1-1998, 12.54.

Aunque el valor de wk^2 se especifica en las normas NEMA MG 1, sección 12- 20, no siempre es tan fácil clasificar el tipo de carga, sin embargo, sí debe aclararse que el valor de A corresponde al máximo para ciertas condiciones, pero que si la inercia de la carga somete al motor a un mayor esfuerzo, debe reducirse aún más el número de arranques por hora.

Este aspecto sólo es considerado por el 11,4% de los ingenieros consultados.

Uso de variador de frecuencia

El desarrollo tecnológico de estos equipos y, especialmente, la gran variedad de ventajas que ofrecen, aunado a los menores precios disponibles en el mercado, hacen que los variadores de frecuencia cada vez sean un componente esencial en la operación de un motor eléctrico, más aún cuando se trata de manejo de velocidad.

A pesar de las bondades de estos dispositivos, se debe recalcar que hay un desconocimiento parcial o total sobre los efectos que tiene este elemento sobre el funcionamiento y desempeño del motor eléctrico, ya que existen condiciones que favorecen las causas de fallas.

Aunque existen motores con diseños especiales para variador, también los motores estándar pueden operar con estos equipos.

Las normas Nema MG 1, sección 12, establecen varias consideraciones. Para este caso, se hará especial mención del torque de carga.

- *Torque del motor durante la operación por debajo de la velocidad base:* para desarrollar el torque constante cuando el motor opera por debajo de su velocidad base, se debe mantener el flujo constante mediante la variación del voltaje de entrada, con el fin de que la relación volts/herz, se mantenga constante. Para frecuencias aproximadamente menores a 30 herz, es posible que se requiera de mayores incrementos de voltaje, excepto en los casos donde la aplicación no requiere un alto torque, especialmente en sistemas de bajo costo (bajas potencias).

- *Torque variable a velocidades reducidas:* para motores de inducción que operan con aplicaciones que requieren ajustes de velocidad puede reducirse el enfriamiento como resultado de la reducción de ventilación (menor velocidad) y el



efecto de las pérdidas adicionales introducidas por los armónicos de la fuente de alimentación.

- *Torque del motor durante la operación por encima de la velocidad base:* el voltaje aplicado al motor queda limitado al voltaje de placa, por ende, al darse incrementos de frecuencia existirán reducciones de flujo, ya que el voltaje se debe mantener constante.

Por lo tanto el torque se reduce con la reducción de volts por herz. Con motores de uso general son capaces de mantener el torque constante por encima de su velocidad base hasta los 90 herz.

Al trabajar con un variador de frecuencia, los principales problemas del uso de motores convencionales quedan claros:

- *Problemas a bajas velocidades:* por lo antes descrito, la autoventilación puede ser insuficiente con el régimen permanente a velocidades inferiores a la base, si se desea mantener el par nominal.

Para esta condición se recomienda reducir el torque de carga, instalar ventilación forzada exterior o bien sobredimensionar el motor. En la práctica, el factor térmico suele ser el que limita la potencia de utilización del motor.

- *Problemas a altas velocidades:* el fabricante del motor no suele garantizar el rango de velocidades por encima de la velocidad base, durante la que mantiene la potencia constante, aunque la autoventilación puede ser mayor, existe una caída muy rápida de la potencia a medida que aumenta la velocidad de giro, debido a la potencia mecánica absorbida por el propio ventilador. También las pérdidas magnéticas en el entrehierro aumentan notablemente con la frecuencia, además de los problemas por lubricación que pueden presentarse.

Se recomienda reducir la carga, sobre diseñar el motor y determinar si el tipo de grasa y rodamientos operan correctamente a altas velocidades.

- *Destrucción de bobinados:* Cuando el variador y el motor operan a distancias mayores a 15-20 metros entre ellos, se pueden generar transitorios de voltaje, lo que causa, con el tiempo la degradación de los bobinados. Se recomienda el empleo de filtros de armónicos, sin embargo, estos protegen la red. Para el motor, debería emplearse un aislamiento especial o cable especial llamado inverter duty. Estos diseños se desarrollan para optimizar la operación del motor ante los cambios de frecuencia para lograr los ajustes en la velocidad de operación.

A pesar de los aspectos citados anteriormente y que deben ser considerados en la selección del motor que requiere operar con estos dispositivos, solo el 21,4% considera importante tomarlos en cuenta para seleccionar un motor eléctrico.



CAPITULO 3 FUNDAMENTOS DE ELECTRONICA DE POTENCIA Y ARRANCADORES DE ESTADO SOLIDO (ARRANCADORES SUAVES).

3.1.1 Normas y homologaciones de simbología eléctrica.

Los símbolos eléctricos son figuras que representan en forma simplificada, elementos de circuitos, aparatos y demás partes que componen un sistema eléctrico, ya sea simple o complicado.

Para poder estandarizar la construcción de equipos eléctricos, sobre todo en lo que se refiere a dimensiones físicas, características constructivas y de operación, condiciones de seguridad, condiciones de servicio y medio ambiente, la simbología utilizada en la representación de equipos y sistemas, se han creado las Normas Técnicas.

En proyectos eléctricos, las normas indican desde la manera como se deben hacer las representaciones gráficas, hasta especificar las formas de montaje y prueba a que deben someterse los equipos. Cada país posee sus propias normas, desarrolladas de acuerdo a las necesidades y experiencias acumuladas por los especialistas.

Entre las normas eléctricas más utilizadas se pueden citar:

- National Electrical Code (**NEC**)
- American National Standards Institute (**ANSI**)
- National Electrical Manufacturers Association (**NEMA**)
- The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (**IEEE**)

Dentro de las normas europeas, las más conocidas en nuestro país son:

- DIN, normas Alemanas generales, dentro de las cuales las normas **VDE** se dedican a los equipos eléctricos (*VerbandDeutscherElektrotechniker*).
- British Standard (**BS**)
- Union Technique d'Electricité (**UTE**)
- International Electrotechnical Comisión (**IEC**)

Historia de las normas eléctricas:

Las normas en sus primeros tiempos

La historia de las normas eléctricas se inicia con las actividades realizadas por el American Institute of Electric Engineers (AIEE). En 1884, comenzó el instituto a desarrollar con gran actividad especificaciones normalizadas para el crecimiento de la industria eléctrica. En 1890 el instituto nombró a su primer comité de normalización, el Committee on Units and Standards.

Se nombró un comité para preparar un programa para los delegados al Congreso Eléctrico Internacional que tuvo lugar en Chicago en 1893, en relación con las unidades, normas y nomenclatura. Como resultados del congreso se adoptaron unidades para la fuerza magnetomotriz (gilbert), para el flujo (weber), para la reluctancia (oersted) y para la densidad de flujo (gauss). Posteriormente, como



resultado de la relación tenida con las grandes organizaciones de ingeniería de Inglaterra, Francia y Alemania, se adoptó el término “inductancia”, para representar el coeficiente de inducción (con el símbolo L) y se propuso por parte de Steinmetz la definición actual del término “reactancia”, la cual fue adoptada.

Las primeras normas eléctricas

En 1896 tuvo lugar una conferencia con el nombre de “National Conference of Standard Electrical Rules”. La conferencia fue presidida por el profesor F. B. Crocker y en cooperación con otras organizaciones nacionales (E.U), la conferencia promulgó las llamadas “Underwriters Rules” o reglas para aseguradores, que finalmente se convirtieron en el National Electrical Code.

A principios de 1898, se organizó una discusión sobre el tema de “normalización de Generadores, Motores y Transformadores”. Esta dio como resultado la formación del primer comité del AIEE sobre normas de productos, el cual publicó en 1899, el primer conjunto de normas eléctricas, bajo el título de “Report of the Committee on Standardization”.

National Bureau of Standards

El instituto fue el primero en promover el proyecto de una ley ante el Congreso de Estados Unidos, en 1901, para establecer un departamento nacional de normalización (national standardizing bureau) en Washington, D.C., “*para la construcción, custodia y comparación de normas o estándares para uso en trabajo científico y técnico*”. Este departamento llegó a conocerse como el National Bureau of Standards y ha tenido una marcada influencia en el crecimiento de la tecnología en Estados Unidos.

Normas eléctricas internacionales

En 1904 se celebró un congreso eléctrico internacional en St. Louis, que sentó un precedente para posteriores congresos internacionales relacionados con las unidades y normas eléctricas. El congreso recomendó de manera unánime el establecimiento de dos comités. El Comité 1 estaba formado por representantes del gobierno y era responsable de la conversión legal de las unidades y estándares. Este comité ha evolucionado ahora para convertirse en la Internacional Conference on Weights and Measures (GPMU). El Comité 2, del cual se eligió presidente a Lord Kelvin, era responsable de las normas relacionadas con los productos comerciales usados en la industria eléctrica y se convirtió después en la Internacional Electrotechnical Comisión (IEC).

El American National Standards Institute (ANSI)

El American Engineering Standards Committee (AESC) se organizó en 1919 como resultado de la acción de cinco organizaciones encabezadas por el AIEE. A esta organización se le ha descrito atinadamente como una “cámara nacional de compensaciones para la normalización industrial” y se ha convertido ahora en el American National Standards Institute.

En sus primeros tiempos se organizó este cuerpo con 12 divisiones. Pocas de



éstas llegaron a ser activas. La división de ingeniería eléctrica, llegó a ser realmente la más fuerte, hasta el punto de tener sus propias leyes particulares. En 1926, bajo los auspicios de esta organización, conocida entonces como la American Standards Association (ASA), se normalizaron las abreviaturas y símbolos de ingeniería. El AIEE, en cooperación con el ASA, patrocinó en 1928 la elaboración de un glosario de términos usados en ingeniería eléctrica. Este trabajo se coordinó con la IEC.

Es interesante observar, que en la industria eléctrica, la normalización básica fue la primera en el orden de desarrollo y data de antes de 1890. En seguida vino la normalización técnica, con la formación del Comité de Normas del AIEE en 1898.

La normalización de la manufactura vino solamente como resultado de la Primera Guerra Mundial y no entró en efecto, sino hasta 1920.

La normalización en los tiempos actuales

Las actividades de normalización internacional, fueron coordinadas por la Organización de Naciones Unidas. Esta actividad vino a resultar en 1947 en la fundación de la ISO o International Organization for Standards. A este cuerpo se le hizo responsable de la normalización en todos los campos que no hubiera cubierto ya el IEC. Las dos organizaciones, aunque separadas y distintas, coordinan sus actividades y comparten unas instalaciones comunes situadas en Génova, Suiza. En Estados Unidos, el sistema de normas voluntarias está desarrollado y la mayoría de las organizaciones coordinan sus actividades por intermedio de ANSI, el American National Standards, organización que sucedió al ASA.



3.1.2 Símbolos de uso general.






Nº	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO
1	Corriente continua	
2	Corriente alterna	
3	Corriente continua o alterna	
4	Corriente trifásica	3 ~ 60Hz - 380 V.
5	Corriente trifásica con neutro	3/N ~ 60Hz - 380 V.
6	Corriente trifásica con neutro y conductor de protección separada.	3/N/pe ~ 60Hz - 380 V.
7	Líneas de alimentación o conductores del circuito de potencia.	
8	Conductores del circuito de mando.	

Tabla 9 continuación



9	Conductores sin conexión eléctrica.	
10	Conductores con conexión eléctrica.	
11	Conexión de conductores a través de bornes o tornillos.	
12	Conductor con indicación del número de conductores.	
13	Bornera.	
14	Placa de borne de un motor trifásico.	
15	Conductores de longitud variable, para ser instalados posteriormente, durante el montaje de la máquina.	
16	Fases.	R S T

Tabla 9 continuación



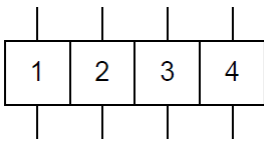
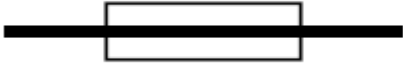
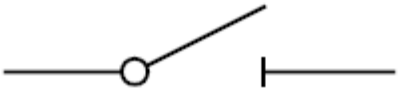
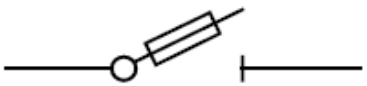

17	Entradas de los contactos principales.	1 3 5 ó L1 L2 L3
18	Salidas de los contactos principales.	2 4 6 ó T1 T2 T3
19	Entradas.	U V W ó X Y Z
20	Bornera.	
21	Fusible.	
22	Seccionador.	
23	Seccionador con fusible.	
24	Contacto de disyuntor.	

Tabla 9 continuación



25	Relé térmico, circuito de fuerza.	
26	Relé termomagnético, circuito de fuerza.	
27	Relé electromagnético, circuito de fuerza.	
28	Contactos principales del contactor.	
29	Contactos auxiliares NA.	
30	Contactos auxiliares NC.	
31	Motor trifásico (3 bornes).	

Tabla 9 continuación



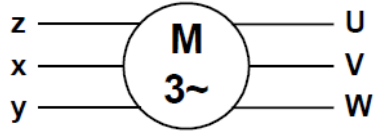
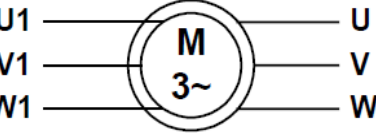
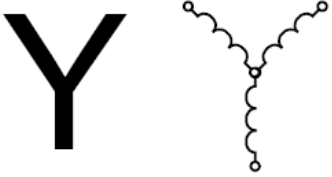

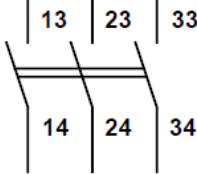

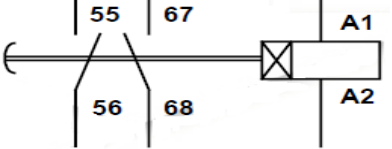
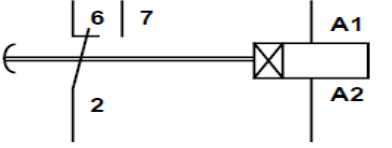
32	Motor trifásico (6 bornes).	
33	Motor trifásico con dos arrollamientos estáticos separados.	
34	Bobina del motor trifásico en conexión estrella.	
35	Bobina del motor trifásico en conexión triángulo.	
36	Interruptor general tripolar.	
37	Contactor eléctrico trifásico.	
38	Temporizador con conexión y desconexión.	
39	Temporizador con contacto conmutado.	

Tabla 9 continuación



40	Temporizador con contacto conmutado.	
41	Pulsador de marcha simple.	
49	Pulsador con llave.	
50	Pulsador de seta.	
51	Selector de dos posiciones.	
52	Selector de cuatro posiciones.	
53	Contacto auxiliar instantáneo NC.	

Tabla 9 continuación



54	Contacto auxiliar instantáneo NA.	
55	Contacto auxiliar temporizado al trabajo.	
56	Contacto auxiliar temporizado al reposo.	
63	Enclavamiento mecánico entre contactores	
57	Contactos auxiliares del relé térmico.	
64	Bobina de contactor.	
58	Interruptores de posición o finales de carrera.	
65	Bobina de temporizador neumático al trabajo.	
59	Temporizador con mecanismo de relojería.	
66	Contactos accionados por flotador.	

Tabla 9 continuación



60	Temporizador electrónico.	
67	Contactos accionados por presión.	
61	Detector fotoeléctrico.	
62	Electrovalvula.	

Tabla 9 Símbolos de uso general.

Elementos de señalización.

Nº	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO
1	Piloto luminoso.	
2	Piloto sonoro (timbre y sirena).	

Tabla 10 Elementos de señalización.



Marcas.

Nº	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO
1	Contactores principales.	C...M K...M
2	Contactador marcha derecha.	C1 K1M
3	Contactador marcha izquierda.	C2 K2M
4	Contactador conexión estrella.	C3 K3M
5	Contactador conexión triángulo.	C5 K5M
6	Contactador auxiliar.	C... K...A
7	Pulsador, interruptores de posición, selectores.	S...
8	Fusibles, relés de protección.	F.
9	Seccionador.	Q...
10	Pilotos.	h.

Tabla 11 Marcas.



Otros símbolos.

N°	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO
1	Contacto auxiliar retardado.	
2	Señalización acústica con bocina.	
3	Señalización acústica con zumbador.	
4	Bobina de dos arrollamientos	

Tabla 12 otros símbolos.

Naturaleza de las tensiones e intensidades.

N°	Significación	Símbolo según las normas		
		IEC	DIN	ANSI
1	Corriente continua.		= IEC	= IEC
2	Corriente alterna.		= IEC	= IEC
3	Corriente continua o alterna (universal).		= IEC	= IEC

Tabla 13 continuación



4	Corriente alterna monofásica. P. ej.: 60 Hz.	1 ~ 60 Hz	= IEC	1 PHASE 2 WIRE 60 CYCLE
5	Corriente alterna trifásica. P. ej.: 380 V 60 Hz.	3~60 Hz 380 V	= IEC	3 PHASE 3 WIRE 60 CYCLE 380 V
6	Corriente alterna trifásica con conductor neutro. P. ej.: 380 V 60 Hz.	3N~60 Hz 380 V	= IEC	3PHASE 3WIRE 60 CYCLE 380 V
7	Corriente alterna trifásica con conductor neutro puesto a tierra.	3NPE~ 60 Hz 380 V 3PEN 60 Hz 380 V	3PEN~ 60 Hz 380V	3PHASE 3WIRE 60 CYCLE 380 V
8	Corriente alterna trifásica con conductor neutro y conductor de protección. P. ej.: 380 V 60 Hz.	3NPE~ 60 Hz 380 V 3PEN~ 60 Hz 380 V	3/N/PE~60 Hz 380V	3PHASE 3WIRE 60 CYCLE
9	Corriente continua - dos conductores. P. ej.: 60 V.	2 - 60 V	= IEC	2 WIRE DC 60 V
10	Corriente continua - dos conductores con conductor medio o neutro. P. ej.: 60 V.	2M - 60 V	= IEC	3 WIRE DC 60 V

Tabla 13 Tensiones e intensidades.



Conductores y Conexiones.




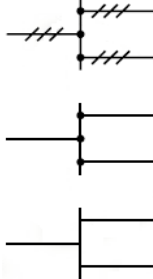
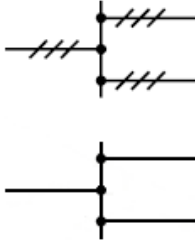


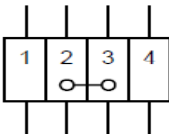
N°	Significación	Símbolo según las normas		
		IEC	DIN	ANSI
1	Conductor. Símbolo general.		= IEC	= IEC
2	Conductor de protección (PE) o neutro puesto a tierra (PEN).		= IEC	= IEC
3	Conductor neutro (N).		= IEC	= IEC
4	Unión conductora de cables.			= IEC
5	Conexión fija.		= IEC	= IEC
6	Conexión móvil.		= IEC	= IEC
7	Regleta de bornes. Bornes de conexión.		= IEC	= IEC

Tabla 14 Conductores y conexiones.



Elementos generales de un circuito.

N°	Significación	Símbolo según las normas		
		IEC	DIN	ANSI
1	Resistencia.			= IEC
2	Resistencia con tomas fijas.		= IEC	= IEC
3	Devanados, bobinas. (Inductancias).			
4	Devanados, bobinas, inductancias con tomas fijas.			
5	Condensador.			
6	Condensador con toma.		= IEC	
7	Tierra.		= IEC	= IEC
8	Masa.			
9	Variabilidad extrínseca.		= IEC	= IEC

Tabla 15 continuación



10	Variabilidad intrínseca.		= IEC	= IEC
----	--------------------------	--	-------	-------

Tabla 15 Elementos generales de un circuito.

Bobinas electromagnéticas

N°	Significación	Símbolo según las normas		
		IEC	DIN	ANSI
1	Sistema de accionamiento, con retroceso automático, al cesar la fuerza de accionamiento, para contactores y similares.		= IEC	
2	Relé con dos devanados activos en el mismo sentido.			
3	Relé o disparador de medida con indicación de la magnitud medida. Por ej.: mínima tensión.			

Tabla 16 continuación



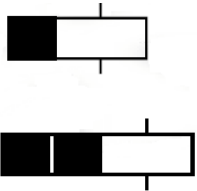
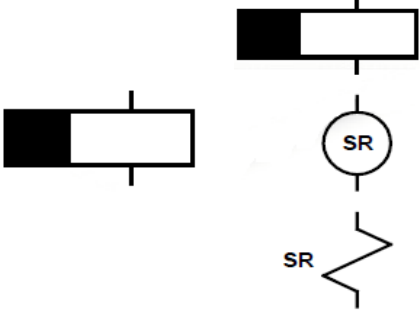
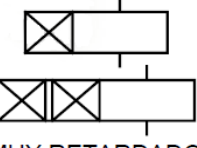
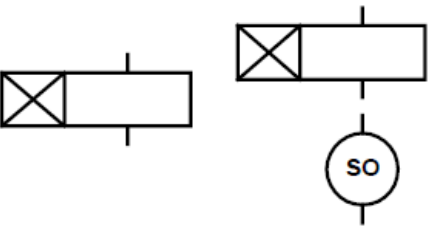

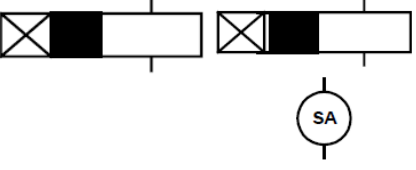
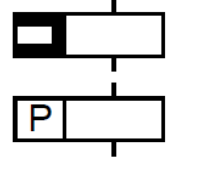
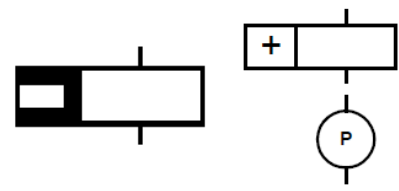
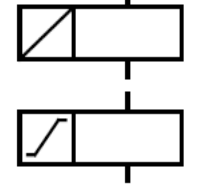
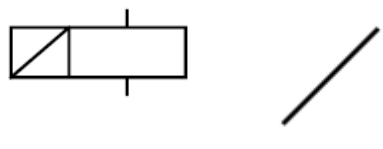
4	Sistema de accionamiento electromecánico retardado. Retraso a la desconexión.	 MUY RETARDADO	
5	Sistema de accionamiento electromecánico retardado. Retraso a la conexión.	 MUY RETARDADO	
6	Sistema de accionamiento electromecánico retardado. Retraso a la conexión y desconexión		
7	Relé polarizado.		
8	Relé de remanencia.		

Tabla 16 Bobinas electromagnéticas.



Elementos semiconductores

N°	Significación	Símbolo según las normas		
		IEC	DIN	ANSI
1	Diodos semiconductores.			
2	Diodo limitador o zener, de un sentido.			
3	Diodo limitador o zener, de doble sentido.			
4	Tiristor.			
5	Triac.			
6	Transistor PNP.			
7	Transistor NPN.			

Tabla 17 Elementos semiconductores.



Transformadores

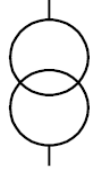

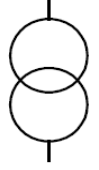

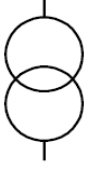


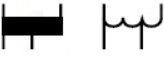










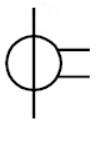
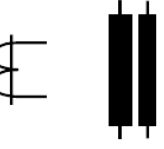
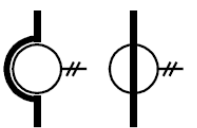


N°	Significación	Símbolo según las normas		
		IEC	DIN	ANSI
1	Transformador con dos devanados separados.	 	 	 
2	Autotransformador..	 	 	 
3	Devanado o bobina en general.	 	 	 
4	Transformador de intensidad.	 	 	

Tabla 18 continuación



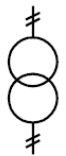

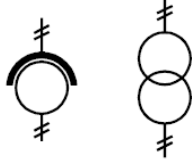


5	Transformador de tensión.	 	 	
---	---------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------

Tabla 18 Transformadores.

Máquinas rotativas

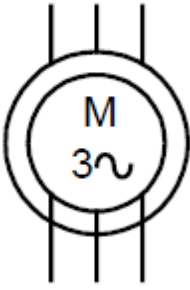
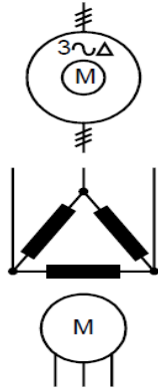
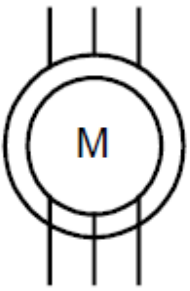
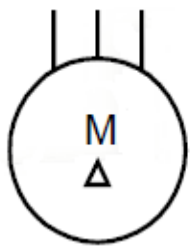
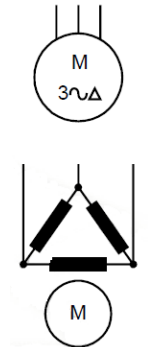
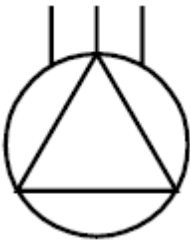
N°	Significación	Símbolo según las normas		
		IEC	DIN	ANSI
1	Motor trifásico con rotor de anillos rozantes.			
2	Motor trifásico con rotor de jaula.			

Tabla 19 continuación



3	Motor trifásico con rotor de jaula, con seis bornes de salida.			
---	----------------------------------------------------------------	--	--	--

Obsérvese que no se dibujan los bornes de conexión en ninguna Norma, lo que no quiere decir que no se identifiquen con sus letras características. Por ejemplo: U, V, W.

Tabla 19 Maquinas rotativas.

Auxiliares de señalización

N°	Significación	Símbolo según las normas		
		IEC	DIN	ANSI
1	Bocina.			
2	Timbre.			
3	Sirena.			
4	Lámpara de señalización.			
5	Indicador de posición.			

Tabla 20 Auxiliares de señalización.



Aparatos de medida

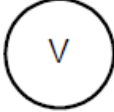


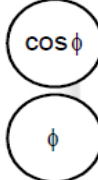
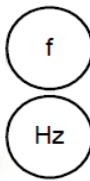
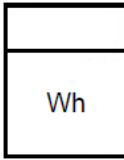
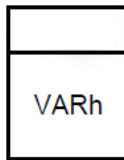
N°	Significación	Símbolo según las normas		
		IEC	DIN	ANSI
1	Voltímetro.		= IEC	
2	Amperímetro.		= IEC	
3	Vatímetro.		= IEC	
4	Fasímetro. (Indicando el factor de potencia o el ángulo).		= IEC	
5	Frecuencímetro.		= IEC	
6	Contador de energía activa.		= IEC	
7	Contador de energía reactiva.		= IEC	

Tabla 21 continuación



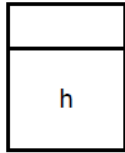
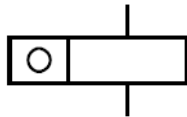
8	Contador de horas.		= IEC	
9	Contador de impulsos.		= IEC	

Tabla 21 Aparatos de medición.

3.1.3 Esquemas eléctricos.

Son las representaciones gráficas de los circuitos e instalaciones eléctricas en los que van indicadas las relaciones mutuas que existen entre sus diferentes elementos, así como los sistemas de conexión que los enlazan entre sí.

Para sus representaciones se emplea básicamente una serie de símbolos, trazos, marcas o índices, los cuales han sido unificados por la Comisión Electrotécnica Internacional (I.E.C.) u otros organismos, los cuales tienden a facilitar, en lo posible, la correcta interpretación de los símbolos mencionados.

Elementos de un esquema eléctrico:

- Símbolos: dibujo convencional.
- Marca que designan dispositivos, aparatos o máquinas.
- Señales de los bornes.
- Señales de los conductores.

CLASIFICACIÓN DE LOS ESQUEMAS ELÉCTRICOS ESQUEMAS EXPLICATIVOS

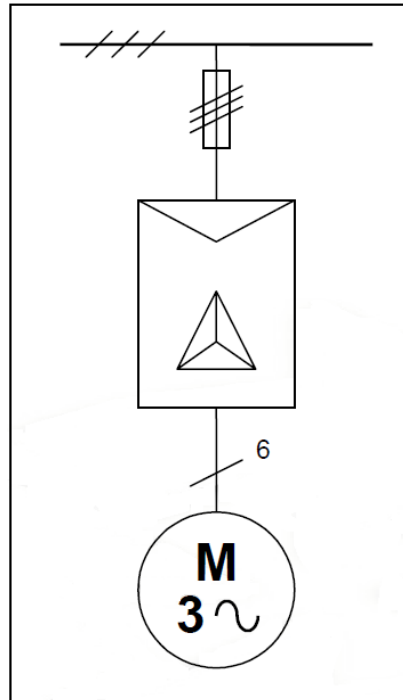
Facilitan el estudio y la comprensión del funcionamiento de una instalación o parte de ella. Por eso se representan todos los dispositivos, conductores, uniones mecánicas y condiciones de interdependencia que intervengan en el funcionamiento descrito o estudiado.

Los esquemas explicativos son los siguientes:

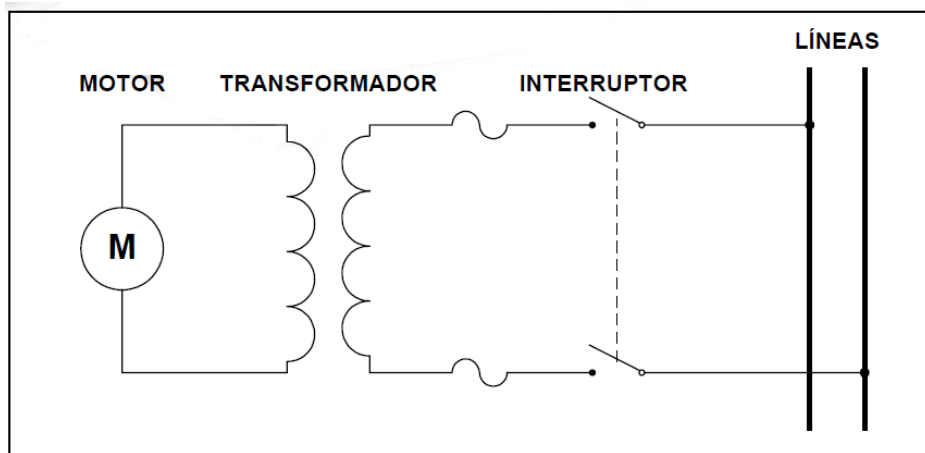
Esquema explicativo funcional

Es la representación más sencilla y clara que presenta todos los elementos de un circuito sin interesar su posición respecto a la realidad.

Este esquema nos permite expresar o estudiar el funcionamiento de alguna instalación de un aparato o de un sistema. Aunque este es una forma sencilla de estudiar y explicar el circuito planteado, la instalación real nunca tendrá esa disposición o montaje de sus elementos o dispositivos.



Arrancador Estrella - triángulo



Instalación de un motor –transformador

Fig.3.1 Ejemplos de esquemas explicativos de funcionamiento

Recomendaciones:

- El trazo de los conductores se hará siempre en posiciones horizontales y verticales, paralelas a los bordes del papel.
- Los trazos de los conductores se cruzarán lo menos posible.
- Se deben complementar con las anotaciones necesarias.



ESQUEMA EXPLICATIVO DE EMPLAZAMIENTO

Es el dibujo que representa a la vez el emplazamiento aproximado de los Aparatos de uso y de los aparatos que los controlan. Se llaman también planos de ubicación.

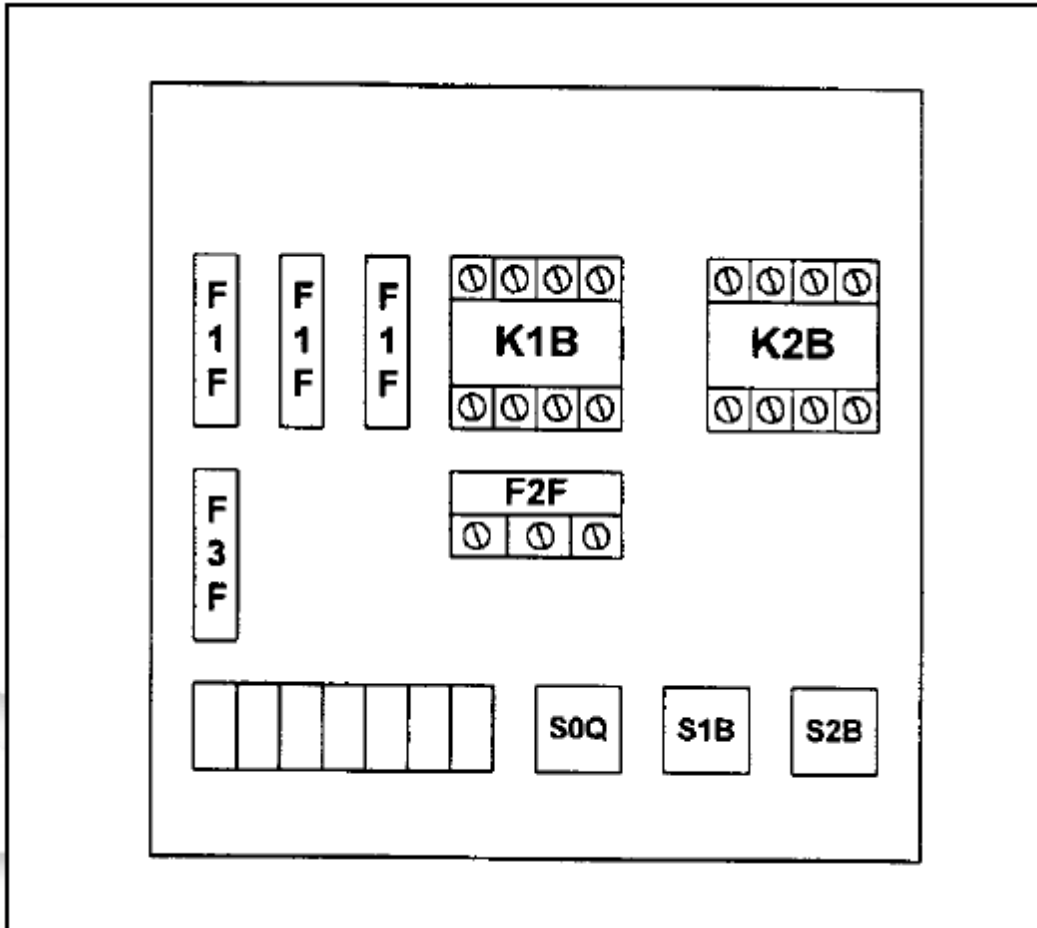


Fig. 3.2 Esquema explicativo de emplazamiento. Tablero de control de un inversor de giro.

ESQUEMA EXPLICATIVO DE PRINCIPIO

En este caso los símbolos de los diferentes elementos de un mismo aparato o de una misma instalación están separados y situados de manera que el trazado de cada circuito se aproxima, en lo posible, a una recta.

La representación explicativa facilita la comprensión de las condiciones de dependencia eléctrica. (Fig. 3.3)

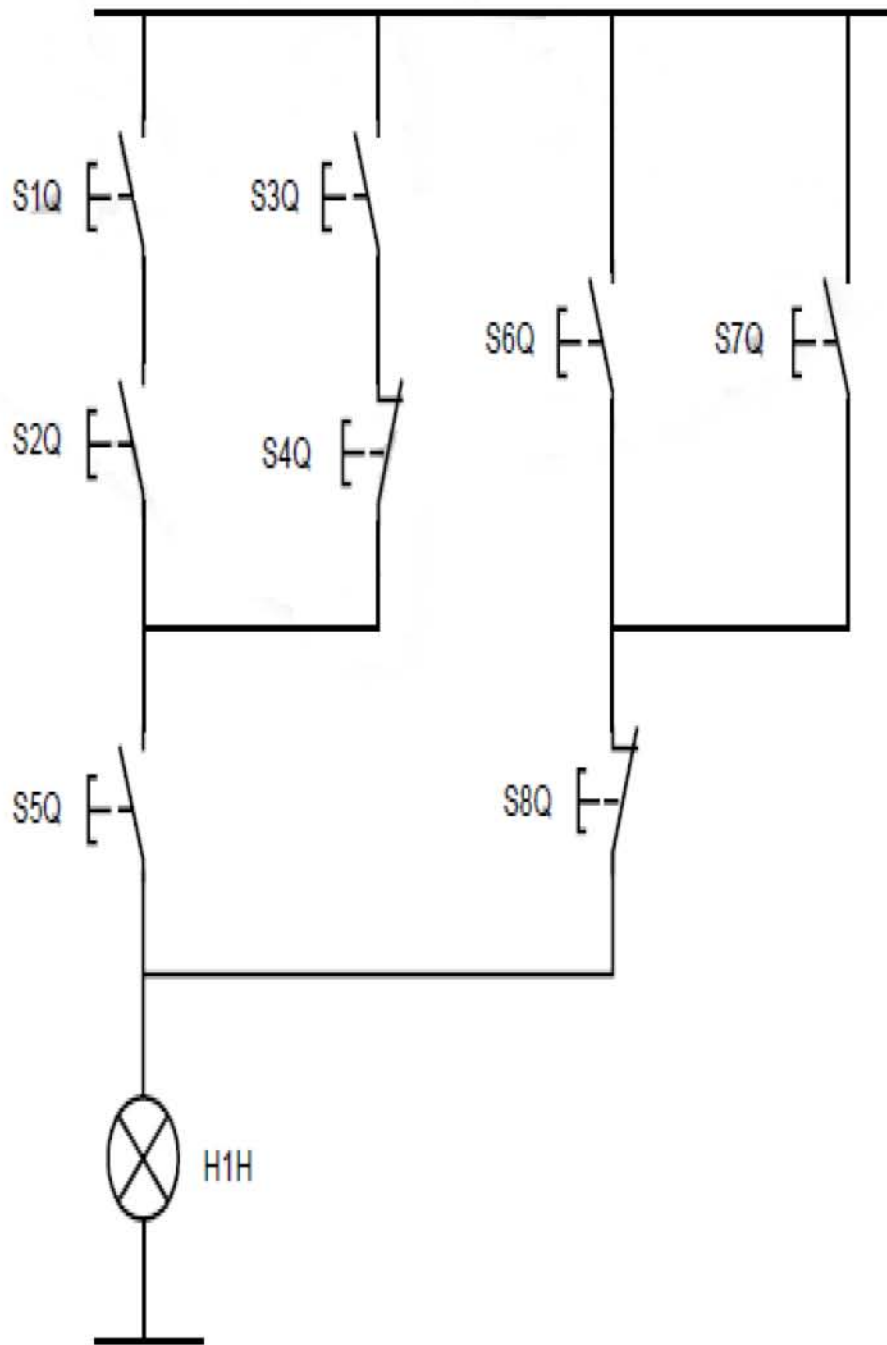


Fig. 3.3 Esquemas explicativos de funcionamiento. Control de una lámpara por pulsadores.



Plano

Es un esquema explicativo, el cual se presenta por intermedio de un mapa geográfico sobre el cual se sitúa el trazado aproximado y muy simplificado de las obras y de las líneas de transporte y distribución de energía.

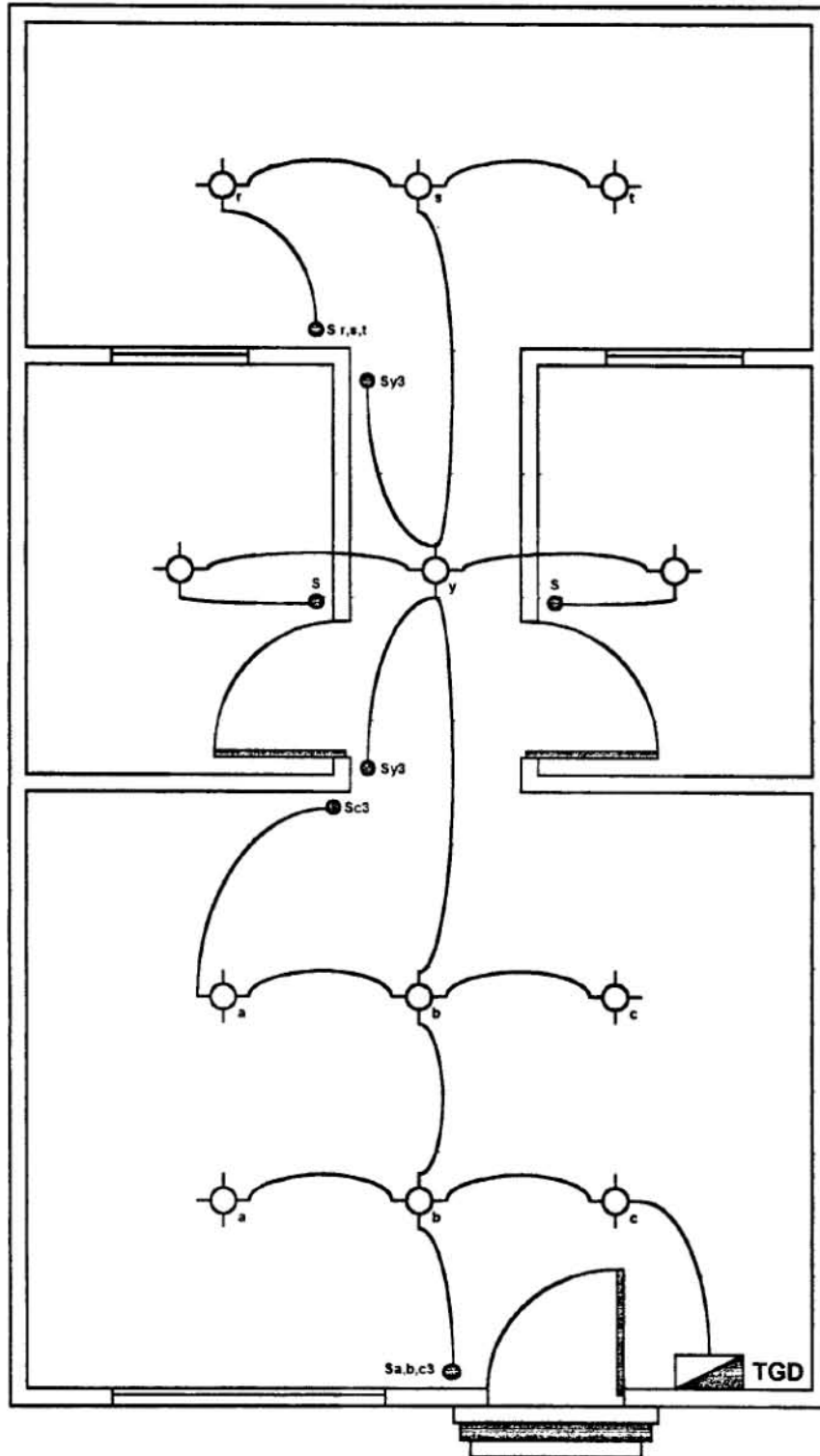


Fig. 3.4 Ejemplo de un plano de una instalación residencial.



ESQUEMAS DE EJECUCIÓN Y MONTAJE

Estos esquemas están destinados a servir de guía en la realización y verificación de las conexiones de una instalación eléctrica o parte de la misma.

Los más utilizados son:

➤ Esquema general de conexiones

Es el esquema en el cual están representados todas las conexiones y todos los conductores.

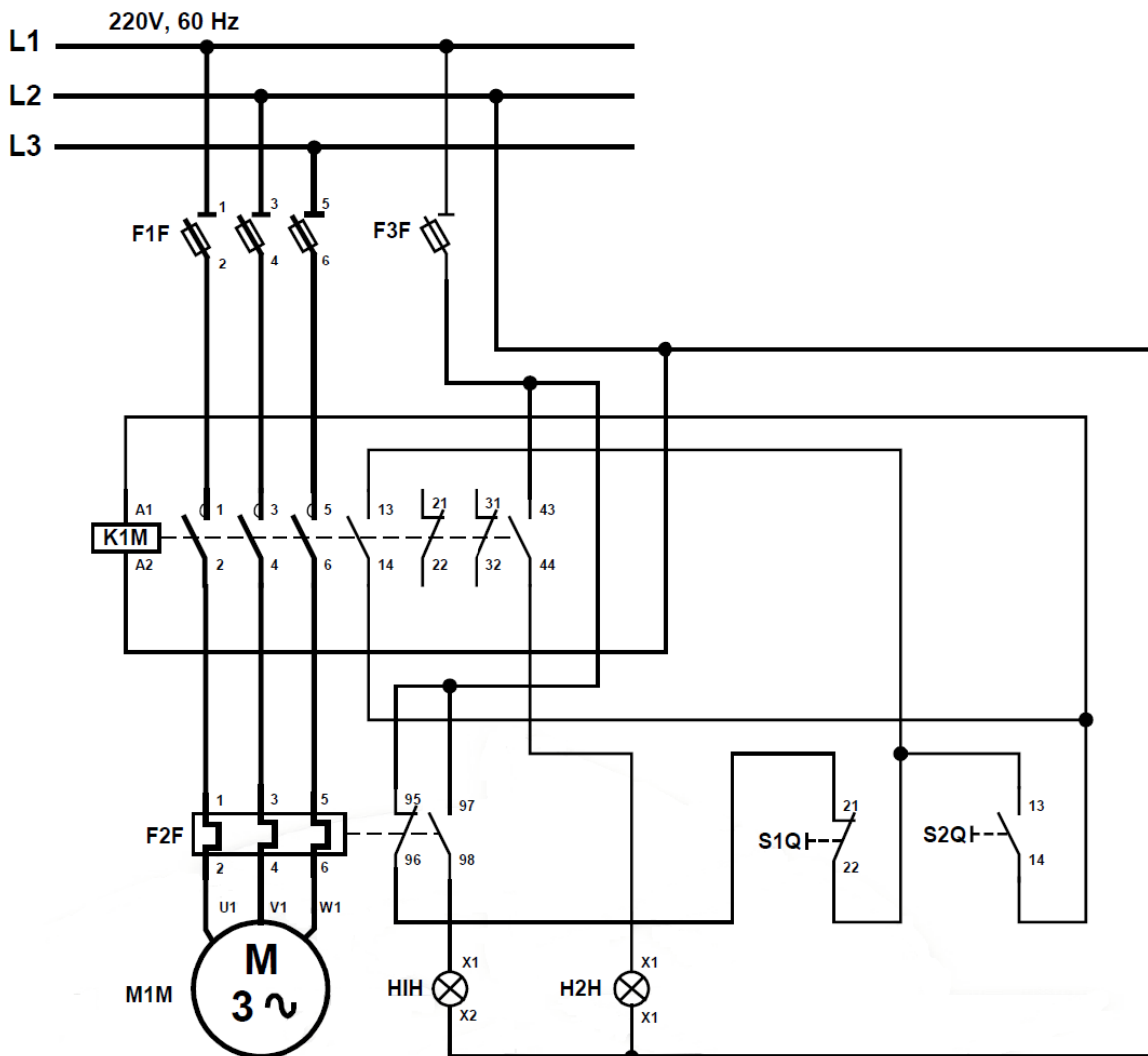


Fig. 3.5 Ejemplo de esquema general de conexiones.

Esquema de entubado (canalización)

Es un esquema que representa las conexiones entre los diferentes aparatos o elementos de una instalación eléctrica.

El esquema de cableado exterior se obtiene trazando un esquema de canalización junto a una relación de aparatos y de dichas canalizaciones.

(Fig. 3.6).

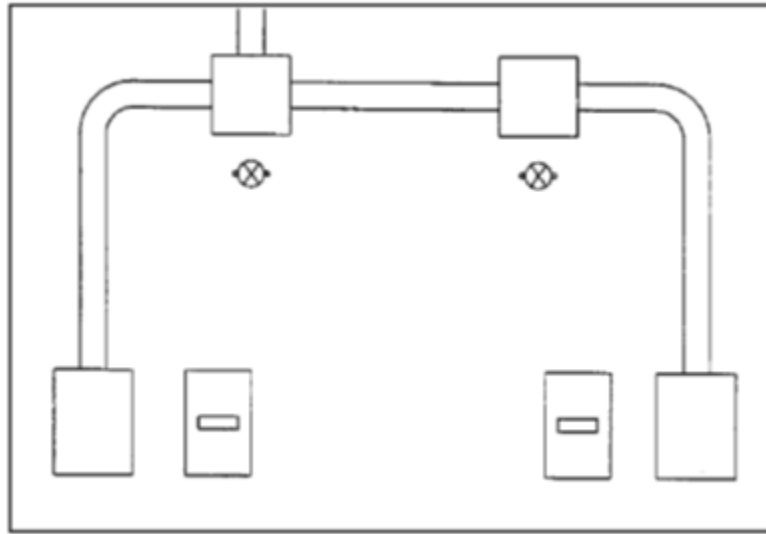


Fig. 3.6 Ejemplo de un esquema entubado.

Esquema unifilar

Es una representación simplificada que comprende circuitos semejantes en los que están incluidos aparatos similares que funcionan simultáneamente.

Se pueden representar varios conductores por un trazo único cruzado por cortos trazos oblicuos cuyo número corresponde a los conductores.

Del mismo modo, varios aparatos y componentes de aparatos que funcionan simultáneamente podrán estar representados por un símbolo único. (Fig.3.7).

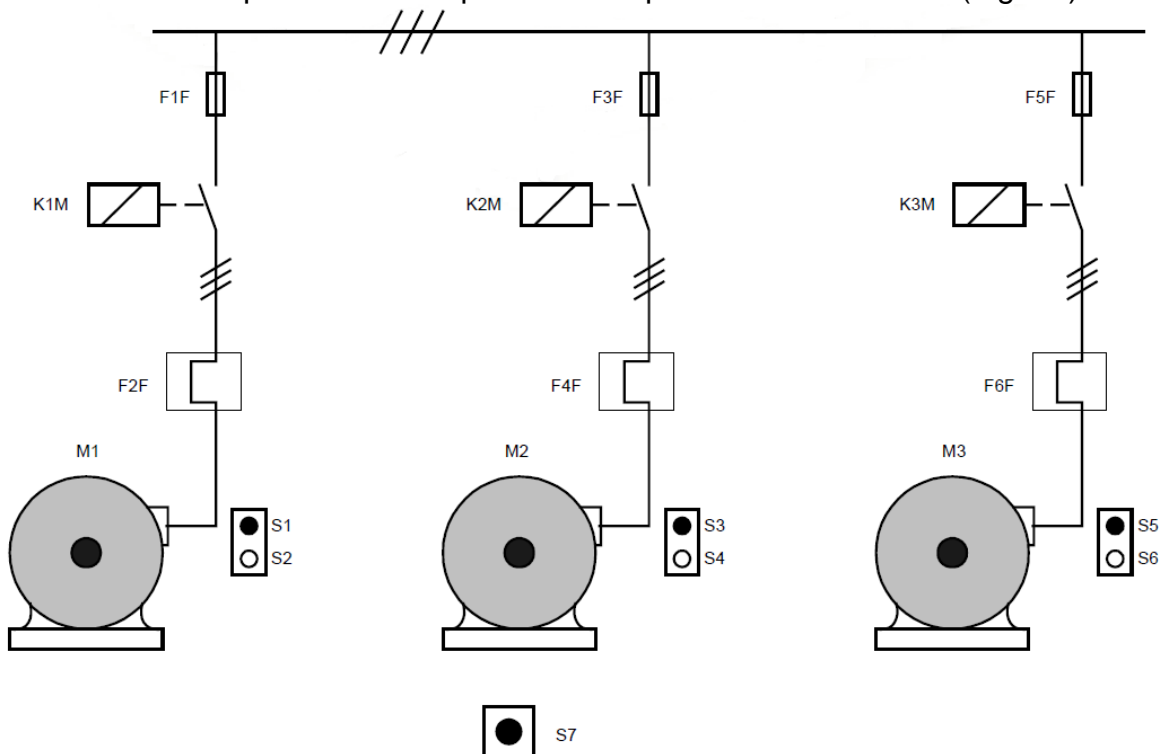


Fig. 3.7 Ejemplo de representación unifilar. Arranque en directo de tres motores.



Diagrama de carga

Es la distribución de cargas, en forma unifilar, de un tablero general de distribución o de una subestación o de un centro de transformación. (Fig. 3.8)

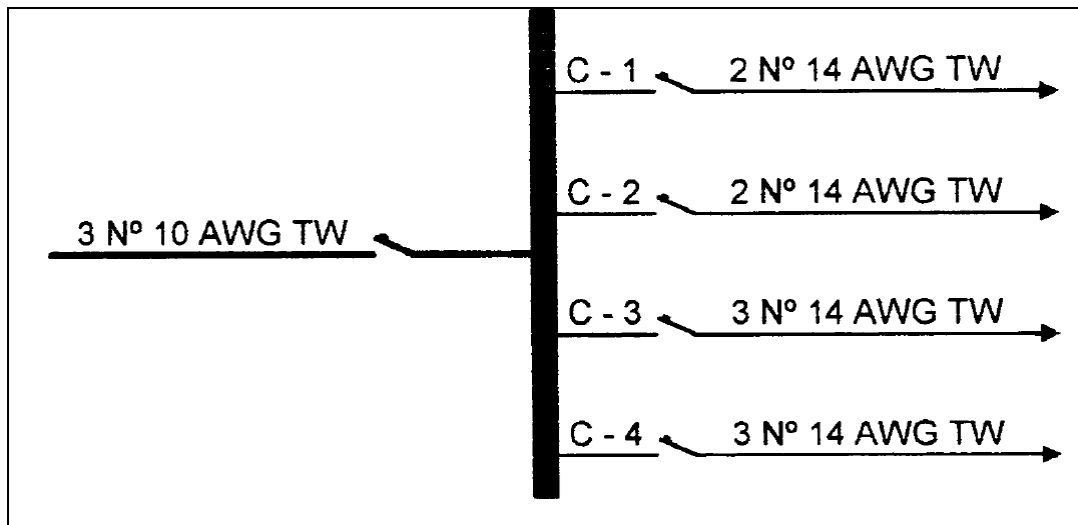


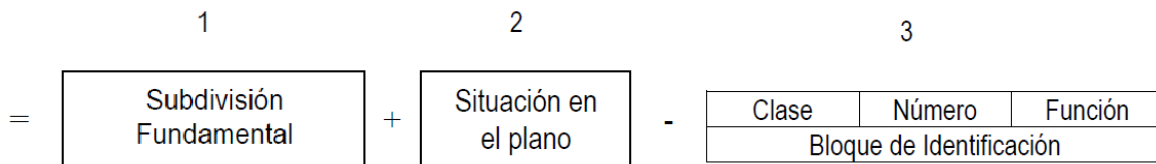
Fig. 3.8 ejemplo de un diagrama de carga.

3.1.4 Reglas básicas para realizar la lectura e interpretación de esquemas eléctricos.

Bloques informativos, de identificación y marcado de bornes para tableros de control:

En todo proyecto, los componentes eléctricos se identifican por medio de un código definido en las normas. La identificación de cada elemento debe ser la misma a lo largo de todo el proyecto, e incluso debe figurar también en el aparato una vez montado.

La identificación completa de un elemento o equipo eléctrico está compuesto por los siguientes bloques:



Bloque 1: (Subdivisión fundamental)

- Su signo característico (=).
- Nos facilita la relación que hay entre cierto número de elementos respecto a su situación o posición en el esquema.
- Nos puede servir como signo de identificación en el cual se nos indica la situación de determinado elemento de un equipo completo.
- Este bloque se debe usar cuando en la instalación, por ejemplo, de un cuadro de automatismos, existen varios sistemas o grupos de equipos y cada uno de ellos consta a su vez de varias unidades o equipos.



Por ejemplo:

- Grupo (sistema) de arrancadores directo que consta de varios equipos(unidades) guardamotores.
- Grupo (sistema) de resistencias calefactores que consta de varios radiadores (unidades).

Bloque 2: (Ubicación en el plano)

- Su signo característico (+).
- Nos facilita la situación de un elemento para una rápida identificación del lugar, que ocupa, entre numerosos elementos con múltiples usos de igual o similar presentación, de un conjunto importante o complejo.
- El código de signos de identificación de la situación se puede basar en una secuencia de números sucesivos o bien en sus coordenadas, de tal forma que no exista ningún tipo de ambigüedad.

Bloque 3: (Bloque de identificación)

Este bloque es el más importante y en la mayoría de los casos es suficiente.

Consta de 3 partes:

- **La clase:** hace referencia del elemento, sin tener en cuenta su función. Se representa por medio de una letra. Cada clase y por lo tanto, cada letra, representa una familia de elementos, siendo el símbolo del elemento utilizado el que nos permite distinguir entre los distintos miembros de esa familia.
- **El número:** se adopta de acuerdo a las necesidades del circuito, es decir la cantidad de dispositivos que se usan, pudiendo utilizar cualquier número natural comenzando por el uno. No es necesario que la numeración forme una secuencia interrumpida.

Para facilitar la lectura se pueden asignar grupos de números o grupos de elementos.

- **La función:** hace referencia al papel o acción que desempeña el elemento en el circuito, independientemente del tipo de elemento que es. Está representada por una letra.

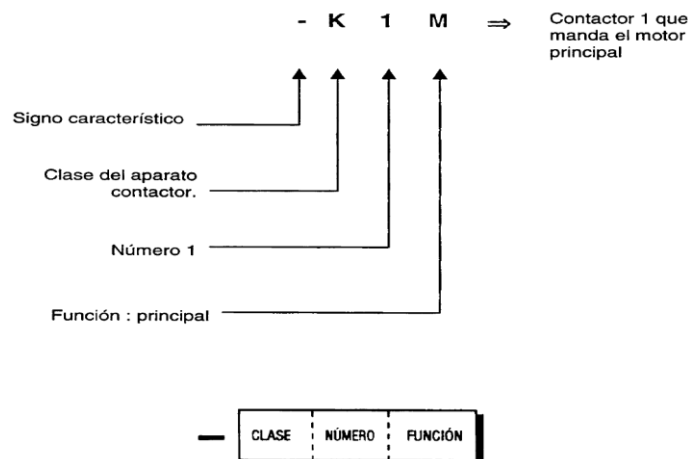


Fig. 3.9 Ejemplo de aplicación: bloque de identificación



3.1.5 Código para formar la parte 3a del bloque de identificación.

Letra	Tipo de aparato	Ejemplos
A	Grupos constructivos, partes de grupos constructivos.	Amplificadores, amplificadores magnéticos, láser, máser, combinaciones de aparatos.
B	Convertidores de magnitudes no eléctricas a magnitudes eléctricas y al contrario.	Transductores, sondas termoeléctricas, termocélulas, células fotoeléctricas, dinamómetros, cristales piezoeléctricos, micrófonos, pick-up, altavoces, aparatos de campo giratorio.
C	Condensadores.	
D	Dispositivos de retardo, dispositivos de memoria, elementos binarios.	Conductores de retardo, elementos biestables, elementos monoestables, memorias de núcleos, registradores, memorias de discos, aparatos de cintas magnéticas.
E	Diversos.	Instalaciones de alumbrado, instalaciones de calefacción; instalaciones que no están indicadas en otro lugar de esta tabla.
F	Dispositivo de protección.	Fusibles, descargador de sobretensión, relés de protección, disparador.
G	Generadores.	Generadores rotativos, transformadores de frecuencia rotativos, baterías, equipos de alimentación osciladores.

Tabla 22 continuación



H	Equipos de señalización.	Aparatos de señalización ópticos y acústicos.
J	-----	-----
K	Relés, contactores.	Contactores de potencia, contactores auxiliares, relés auxiliares, relés intermitentes, relés de tiempo, relés Reed.
L	Inductividad.	Bobinas de reactancia.
M	Motores.	-----
N	Amplificadores, reguladores.	Circuitos integrados.
P	Instrumentos de medición, equipos de pruebas.	Instrumentos de medición, registradores y contadores, emisores de impulsos, relojes.
Q	Aparatos de maniobra para altas intensidades.	Interruptores de potencia, seccionadores, interruptores de protección, interruptores para protección de motores, interruptores automáticos, seccionadores bajo carga con fusibles.
R	Resistencias.	Resistencias, potenciómetros, reostatos, shunts, resistencias, en derivación, termistores.
S	Interruptores, selectores.	Pulsadores, interruptores de posición, interruptores de mando, conmutador – selector, selectores rotativos, adaptadores selectores, emisores de señales.
T	Transformadores.	Transformadores de tensión, transformadores

Tabla 22 continuación



		de intensidad.
U	Moduladores, convertidores.	Discriminadores, convertidores de frecuencia, demoduladores, convertidores, inversores, onduladores.
V	Válvulas, semiconductores.	Válvulas de vacío, válvulas de descarga en gases, diodos, transistores, tiristores.
W	Vías de conducción, guíaondas.	Hilos de conexión, cables, guíaondas, acoplamientos dirigidos por guíaondas, dipolos, antenas parabólicas.
X	Bornes, clavijas, enchufes.	Clavijas y cajas de enchufe, clavijas de pruebas, regletas de bornes, regletas de soldadura.
Y	Equipos eléctricos accionados mecánicamente.	Frenos, embragues, válvulas.
Z	Equipos de compensación, filtros limitadores.	Circuitos para imitación de cables, reguladores dinámicos, filtros de cristal.

Tabla 22 Código para formar la tercera parte del bloque de identificación.



3.1.6 Código de letras para determinar la función.

Letra	Función
A	Función auxiliar. Sentido de movimiento (Adelante, atrás, subir, bajar, sentido horario y sentido antihorario).
B	Contar.
C	Diferenciar
D	.
E	Función "conexión".
F	Protección.
G	Prueba.
H	Ensayo.
J	Señalización.
K	Integración.
L	Servicio sensorial. Aproximación (por ej.: nivelar).
M	Denominación de conductor.
N	Función principal.
P	Medida.
Q	Proporcional.
R	Estado (marcha, parada, limitación).
S	Reposición, bloqueo, borrado, reenganche, anulación.
T	Memorizar, registrar.
U	Medida de tiempo, retardar. Temporización.
V	
W	Velocidad (acelerar, frenar).
X	Sumar.
Y	Multiplicar.
Z	Analógica. Digital. Numérico.

Tabla 23 código de letras para determinar la función.



3.2.1 Componentes de electrónica de potencia.

Varios de los principales tipos de dispositivos semiconductores se utilizan en los circuitos de control de motores. Entre los más importantes están

1. El diodo
2. El tiristor de dos hilos (o diodo PNP)
3. El DIAC
4. El TRIAC
5. El transistor de potencia (PTR)
6. El transistor bipolar por puerta aislada (IGBT)
7. El diodo

El diodo

Un diodo es un semiconductor diseñado para conducir corriente en una sola dirección. En la figura 3.10 aparece el Símbolo de este dispositivo. Un diodo está diseñado para conducir corriente desde su ánodo hasta su cátodo, pero no en la dirección opuesta. La figura 3.11 muestra la característica de voltaje-corriente del diodo. Cuando se aplica un voltaje al diodo en la dirección conductora, resulta un gran flujo de corriente. Cuando se aplica un voltaje al diodo en la dirección inversa, el flujo de corriente queda limitado a un valor muy pequeño (del orden de micro amperes o menos). Si se aplica al diodo un voltaje suficientemente grande en sentido inverso, se romperá y permitirá el flujo de corriente en la dirección inversa. Estas tres regiones de operación del diodo se muestran en la característica de la figura 3.11. Los diodos están dimensionados para una cantidad de potencia que pueden disipar con seguridad y para un voltaje inverso máximo que pueden soportar antes de romperse. La potencia que disipa un diodo durante su operación en dirección conductora es igual a la caída de voltaje en el diodo multiplicada por la corriente que fluye en éste. Esta potencia debe ser limitada para proteger el diodo del sobrecalentamiento. El voltaje inverso máximo de un diodo se conoce como voltaje inverso de pico (PIV), que debe ser suficientemente grande para asegurar que el diodo no se rompa en el circuito y conduzca en la dirección inversa.

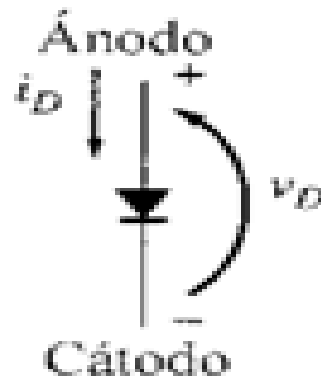


Fig.3.10 Símbolo del diodo.

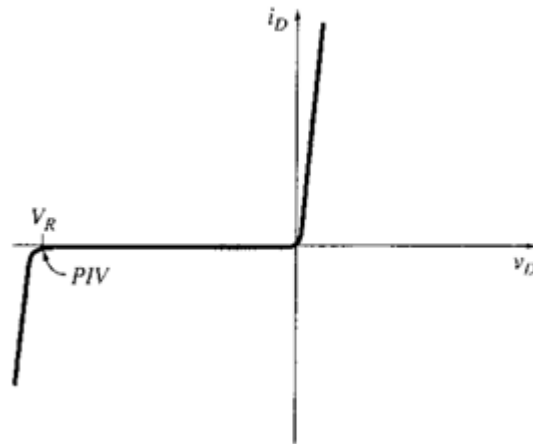


Fig. 3.11 Característica voltaje-corriente de un diodo.

Los diodos también se dimensionan por el tiempo de conmutación, tiempo que toma en pasar del estado de apagado al de encendido, y viceversa. Debido a que los diodos de potencia son grandes, los elementos de alta potencia con una gran cantidad de carga almacenada en sus juntas, conmutan su estado mucho más lentamente que los diodos utilizados en los circuitos electrónicos. En esencia, todos los diodos de potencia pueden cambiar de estado con gran rapidez para utilizarlos como rectificadores en circuitos de 50 y 60 Hz. Sin embargo, algunas aplicaciones como modulación de ancho de pulso (PWM) pueden requerir diodos de potencia que conmuten de estado a tasas mayores de 10,000 Hz. En estas aplicaciones de muy rápida conmutación, se utilizan diodos especiales llamados diodos de alta velocidad de recuperación.

El tiristor de dos hilos o diodo PNPN

Tiristor es el nombre genérico dado a una familia de semiconductores que tienen cuatro capas de materiales semiconductores. Un miembro de esta familia es el tiristor de dos hilos, conocido como diodo PNPN o diodo trigger. El nombre de este elemento en la norma para símbolos gráficos del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) es tiristor tipo diodo de bloqueo inverso. Su símbolo se muestra en la figura 3.12.

El diodo PNPN es un rectificador o diodo con una característica inusual de voltaje-corriente en la región de polarización directa, la cual se muestra en la figura 3.13, en la que se observa que la curva consta de tres regiones:

1. La región de bloqueo inverso
2. La región de bloqueo directo
3. La región de conducción

En la región de bloque inverso, el diodo PNPN se comporta como cualquier diodo y bloquea el flujo de corriente hasta que se alcanza la tensión de ruptura inversa. En la región de conducción, el diodo PNPN se comporta de nuevo como cualquier diodo, permitiendo el flujo de grandes cantidades de corriente con muy poca caída de voltaje. La región de bloqueo directo distingue un diodo PNPN de un diodo común.

Cuando se polariza un diodo directamente, no fluye corriente hasta tanto la caída



de tensión directa exceda cierto valor llamado voltaje de transición conductiva V_{BO} . Cuando el voltaje directo del diodo PNPN excede el valor V_{BO} , se enciende y permanece encendido hasta que la corriente que pasa a través de él cae por debajo de cierto valor mínimo (típicamente unos pocos miliamperes). Si la corriente se reduce a un valor por debajo de este mínimo (llamarlo corriente de sostenimiento I_H), el diodo PNPN se apaga y no conduce hasta que la caída de voltaje directo exceda nuevamente a V_{BO} .

En resumen, un diodo PNPN

1. Se enciende cuando se le aplica voltaje V_D mayor que V_{BO}
2. Se apaga cuando la corriente I_D cae por debajo de I_H
3. Bloquea todo el flujo de corriente en dirección inversa hasta que se excede el máximo voltaje inverso

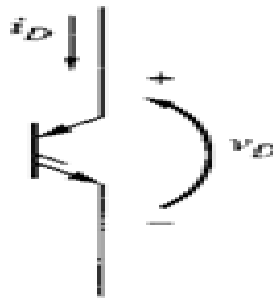


Fig.3.12 Símbolo de un tiristor de 2 hilos o diodo PNPN.

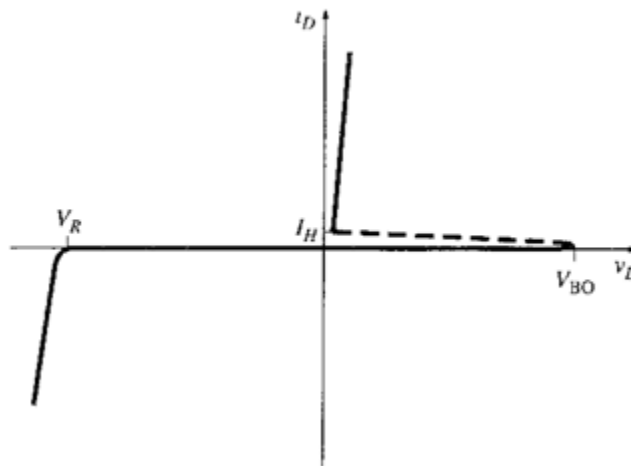


Fig.3.13 Característica voltaje-corriente de un de un diodo PNPN.

El tiristor de tres hilos o SCR

El miembro más importante de la familia de los tiristores es el tiristor de tres hilos, conocido como rectificador controlado de silicio SCR. En 1958 la General Electric Company desarrolló este elemento y le dio nombre. El nombre de tiristor fue adoptado después por la International Electrotechnical Commission (IEC). El



símbolo para el tiristor de tres hilos o SCR se muestra en la figura 3.14. Como su nombre lo sugiere, es un diodo o rectificador controlado. Su característica voltaje- corriente, con el terminal de puerta abierto, es la misma que para un diodo PNP. El SCR es muy útil en aplicaciones de control de motores porque su tensión de transición conductiva, o voltaje de encendido, puede ajustarse mediante la corriente que fluye en su terminal de puerta. Cuanto mayor sea la corriente de puerta, menor llega a ser el voltaje V_{BO} , (vease figura 3.15). Si se escoge un SCR tal que su tensión de transición conductiva sin serial de puerta es mayor que el voltaje mayor del circuito, solo puede ser encendido por la aplicación de una corriente de puerta. Una vez encendido, permanece así hasta que su corriente cae por debajo de I_H . De esta manera, una vez activado el SCR, su corriente de puerta puede quitarse sin afectar su estado. En el estado de encendido, la caída de tensión directa a través del SCR es alrededor de 1.2 a 1.5 veces mayor que la caída de tensión a través de un diodo común polarizado directamente. Los tiristores de tres hilos o SCR son en definitiva los elementos muy utilizados en los circuitos de control de potencia pues se utilizan en aplicaciones de conmutación o rectificación y se encuentran disponibles en valores nominales desde unos pocos amperios hasta un máximo de casi 3000 A.

En resumen, un SCR

1. Se enciende cuando el voltaje V_D que se le aplica excede a V_{BO}
2. Tiene un voltaje de transición V_{BO} cuyo nivel es controlado por la cantidad de corriente de puerta i_G presente en el SCR
3. Se apaga cuando la corriente I_D , que fluye a través de él cae por debajo de I_H .
4. Bloquea todo flujo de corriente en dirección inversa hasta que se excede el voltaje inverso máximo.

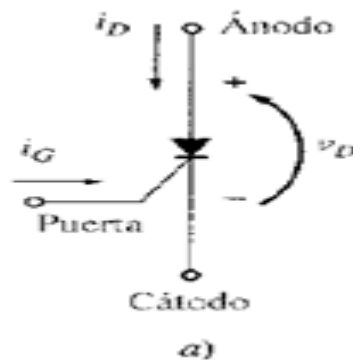


Fig 3.14 Símbolo de un tiristor de 3 hilos SCR.

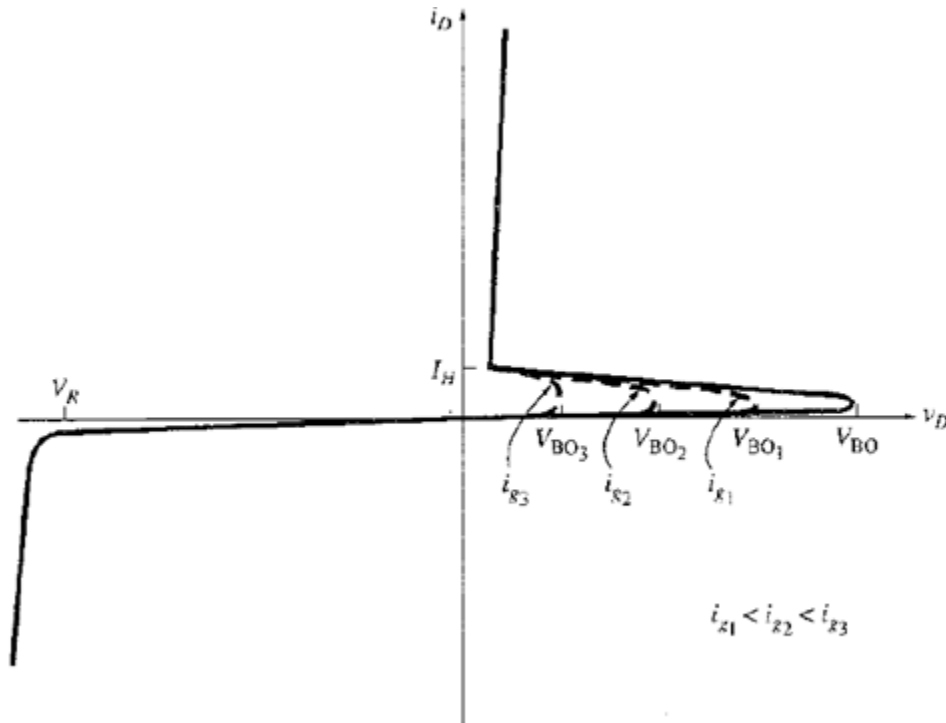


Fig.3.15 Característica voltaje-corriente de un SCR.

El tiristor de interrupción por puerta.

El tiristor de interrupción por puerta (GTO), Un tiristor GTO es un SCR que se puede apagar por un pulso suficientemente negativo en su terminal de puerta, aun cuando la corriente i_D exeda a i_H . Aunque los tiristores GTO se introdujeron desde los años sesenta, solo se aplicaron a el control de motores hacia los años setenta. Estos dispositivos han llegado a ser más y más comunes en los paquetes de control de motores por que eliminan la necesidad de componentes externas para el apagado de SCR en los circuitos dc. El símbolo para un tiristor GTO se muestra en la figura 3.16a.

La figura 3.16b muestra la onda típica de la corriente de puerta para un tiristor GTO de alta potencia. Un tiristor GTO requiere una corriente de encendido mayor que la de un SCR. Para dispositivos de alta potencia, se requieren corrientes de puerta de 10 A o más, para apagar el equipo se requiere un pulso negativo grande de 20-30 μ s de duración. La magnitud del pulso de corriente negativa debe ser un cuarto o un sexto de la corriente que fluye a través del dispositivo.

El DIAC

El DIAC es un dispositivo que contiene 5 capas semiconductoras (PNPNP) que se comportan como dos diodos PNP conectados espalda con espalda. Puede conducir en cualquier dirección cuando se ha excedido el voltaje de transición conductiva. El símbolo para el



DIAC se muestra en la figura 3.17 y su característica de corriente-voltaje en la figura 3.18. El DIAC se enciende cuando el voltaje aplicado en cualquier dirección excede a V_{BO} . Una vez encendido el DIAC permanece a si hasta que su corriente cae por debajo de I_H .

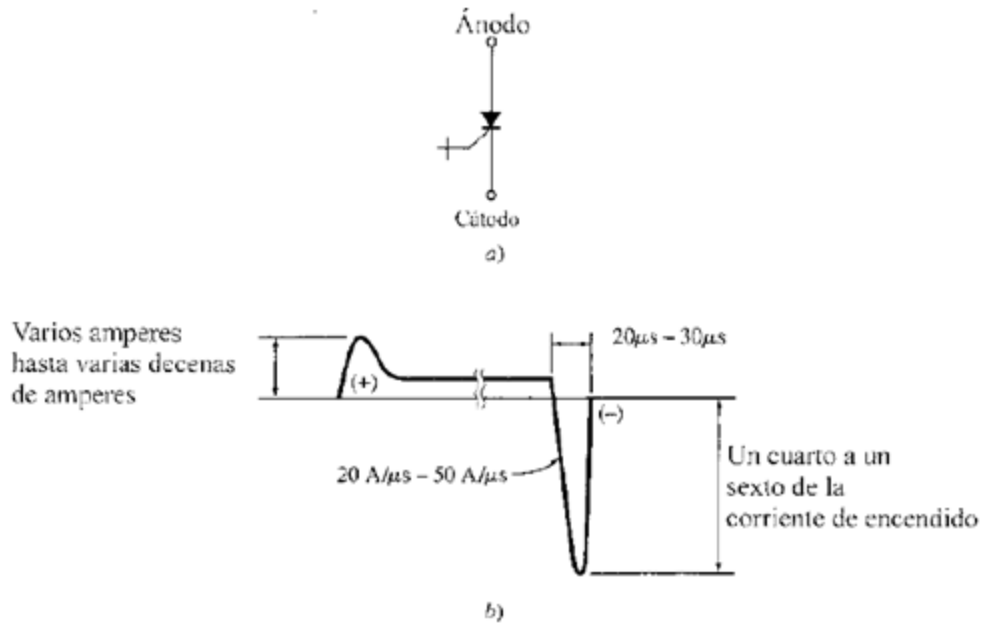


Fig. 3.16 a) Símbolo de un tiristor GTO. b) Onda de corriente de ouerta requerida para encender y apagar un tiristor GTO.

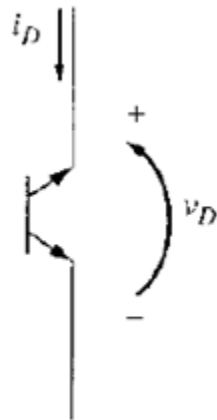


Fig. 3.17 Símbolo de un DIAC.

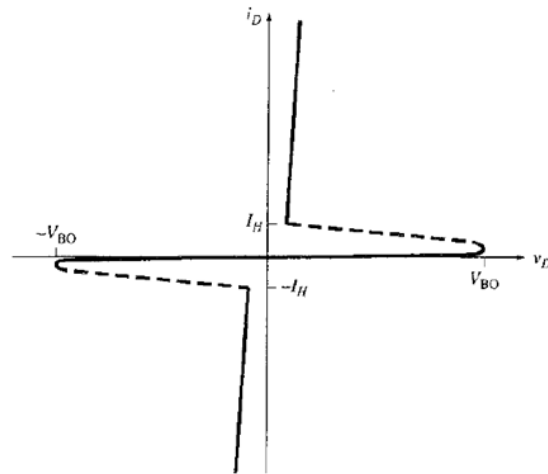


Fig.3.18 Característica voltaje-corriente de un DIAC.

EL TRIAC

El TRIAC es un dispositivo que se comporta como dos SCR conectados espalda con espalda con un terminal de puerta común. Puede conducir en cualquier dirección una vez que se ha excedido su voltaje de transición conductiva. El símbolo de un TRIAC se muestra en la figura 3.19 y su característica corriente-voltaje, en la figura 3.20. El voltaje de transición conductiva de un TRIAC decrece cuando se incrementa la corriente de puerta, como ocurre en el SCR, excepto por que un TRIAC responde a pulsos positivos o negativos en su puerta. Una vez activado El TRIAC, permanece encendido hasta que su corriente cae por debajo de I_H .

Debido a que un solo TRIAC puede conducir en ambas direcciones, se puede remplazar un par más complejo de SCR espalda con espalda en muchos circuitos de control de corriente alterna. Sin embargo, los TRIAC conmutan generalmente más despacio que los SCR y se encuentran disponibles sólo a bajas potencias. Como resultado, están fuertemente restringidos a aplicaciones de baja y mediana potencia en circuitos de 50 Hz o 60 Hz, como los circuitos sencillos de alumbrado.

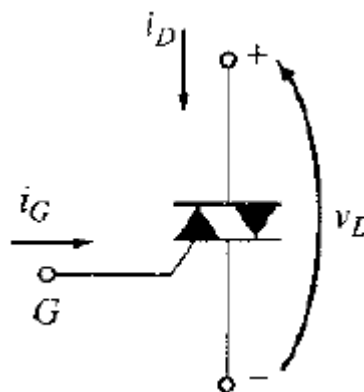


Fig.3.19 Símbolo de un TRIAC.

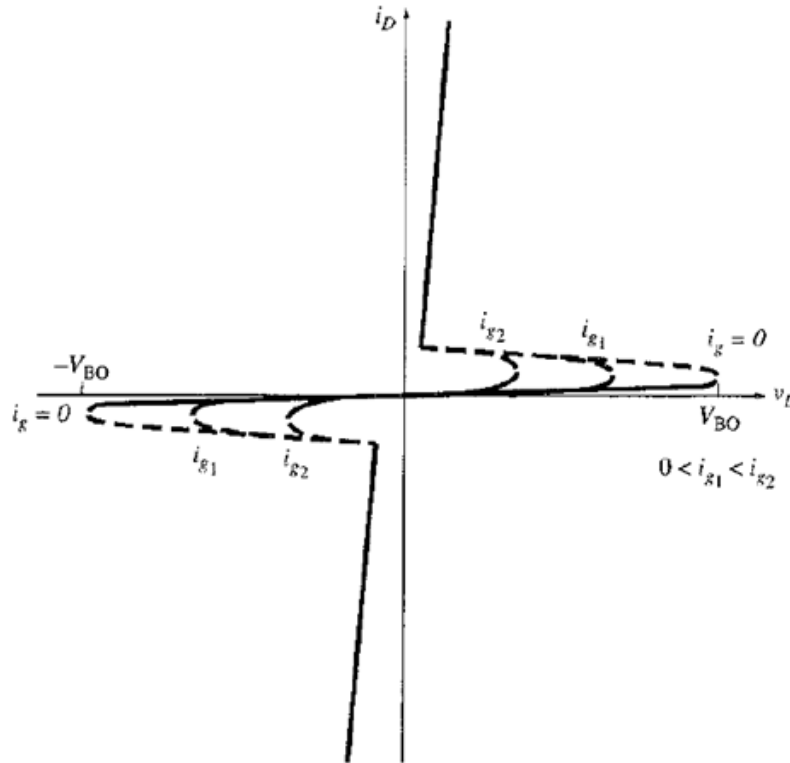


Fig. 3.20 Característica voltaje-corriente de un TRIAC.

El transistor de potencia

En la figura 3.21a se muestra el símbolo para un transistor y, en la figura 3.21b, su característica voltaje de colector a emisor-corriente del colector. Como puede verse en la figura 3.21b, el transistor es un dispositivo cuya corriente de colector i_C , es directamente proporcional a su corriente base i_B , para un amplio rango de voltajes de colector a emisor (V_{CE}).

Los transistores de potencia (PTR) se utilizan comúnmente en aplicaciones de control de máquinas para conmutar el encendido o apagado de una corriente. La figura 3.22a muestra un transistor con carga resistiva y, la figura 3.22b, su característica i_C - V_{CE} , y la línea de la carga resistiva. Los transistores se utilizan como interruptores en aplicaciones de control de máquinas; como tales, deben estar completamente encendidos o completamente apagados. Como se muestra en la figura 3.22b, una corriente base i_{B4} , podría encender por completo el transistor mientras que una corriente base de cero podría apagarlo por completo.

Si la corriente base de este transistor fuera igual a i_{B3} , el transistor no estaría ni encendido ni apagado por completo. Ésta es una condición indeseable ya que fluiría una abundante corriente de colector a través de un gran voltaje de colector a emisor V_{CE} , disipando mucha potencia en el transistor. Para garantizar que el transistor conduce sin demasiado gasto de potencia, se requiere una alta corriente base. Suficiente para saturarlo por completo.

Los transistores de potencia se utilizan con más frecuencia en circuitos



inversores. Su mayor desventaja en aplicaciones de conmutación es que los transistores de gran potencia son relativamente lentos para cambiar del estado de encendido al de apagado, y viceversa, ya que se debe aplicar o remover una corriente base relativamente grande cuando ellos se encienden o se apagan.

El transistor bipolar de puerta aislada

El transistor bipolar de puerta aislada (IGBT). Es similar al transistor de potencia, excepto que es controlado por un voltaje aplicado a la puerta en lugar de la corriente que fluye en la base del transistor de potencia. La impedancia de la puerta de control es muy alta en un IGBT, de modo que la cantidad de corriente que fluye en ella es en extremo pequeña. El dispositivo es básicamente equivalente a la combinación de un transistor semiconductor metal-óxido de efecto de campo (MOSFET) y un transistor de potencia.

Puesto que el IGBT es controlado por un voltaje de puerta con un flujo de corriente muy pequeño, puede conmutar con mucha más rapidez que el transistor de potencia convencional. Los IGBT se utilizan en aplicaciones de alta potencia y alta frecuencia.

Comparación de componentes de potencia electrónicas según potencia y velocidad

La figura 3.23 muestra una comparación de las velocidades relativas y las capacidades de conducir potencia de los SCR, los tiristores GTO y los transistores de potencia. Se observa con claridad que los SCR son capaces de operar a mayores potencias que cualquiera de los demás. Los tiristores GTO pueden operar a casi tan alta potencia y con mucha más rapidez que los SCR. Por último, los transistores de potencia pueden manejar menos potencia que cualquier tipo de tiristor, pero pueden conmutar con una rapidez más de 10 veces mayor.

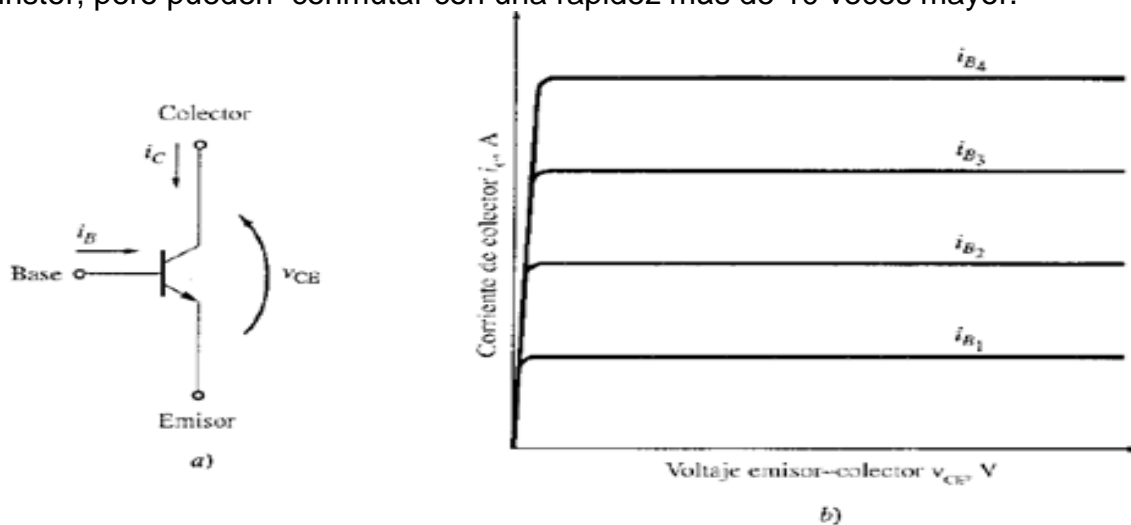


Fig. 3.21 a) Símbolo de transistor de potencia. b) Característica de voltaje-corriente del transistor de potencia.

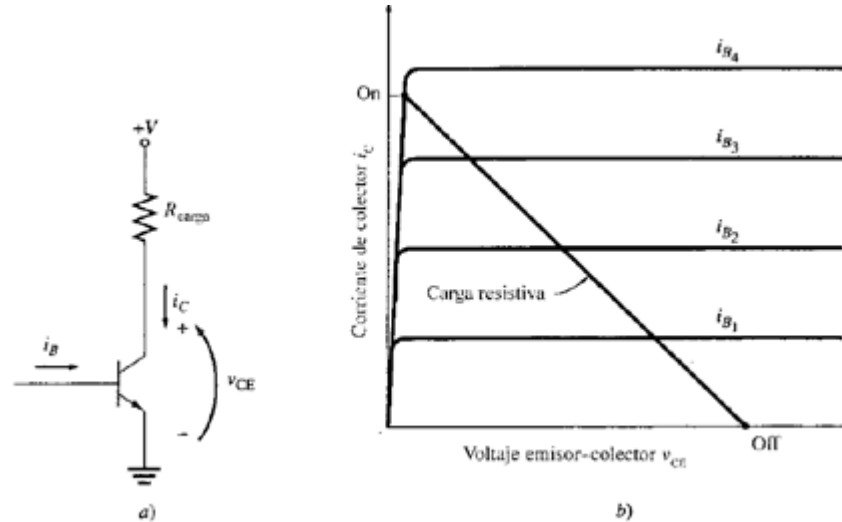


Fig. 3.22 a) Transistores con carga resistiva. b) Característica voltaje-corriente de este transistor y su carga.

3.2.2 Circuitos rectificadores básicos.

Un circuito rectificador convierte potencia alterna en potencia directa. Hay muchos circuitos de rectificación diferentes que producen varios grados de aplanamiento en su salida dc. Los cuatro circuitos de rectificación más comunes son:

1. El rectificador de media onda
2. El puente rectificador de onda completa
3. El rectificador trifásico de media onda
4. El rectificador trifásico de onda completa

Una buena medida del aplanamiento del voltaje dc a la salida del circuito rectificador es el factor de rizado (factor de ondulación) de la salida dc. El porcentaje de rizado en un suministro de potencia dc se define como la relación entre el valor rms de las componentes de corriente alterna en el voltaje de la fuente, y el valor dc del voltaje

$$r = \frac{V_{ac,rms}}{V_{DC}} \times 100\%$$

Donde $V_{ac,rms}$ es el valor rms de las componentes ac del voltaje de salida y V_{DC} es la componente dc del mismo voltaje. Cuanto menor sea el factor de rizado en una fuente de potencia, más plana será la onda dc resultante.

La componente dc del voltaje de salida V_{DC} es muy fácil de calcular ya que es el promedio del voltaje de salida del rectificador:

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int V_0(t) dt$$

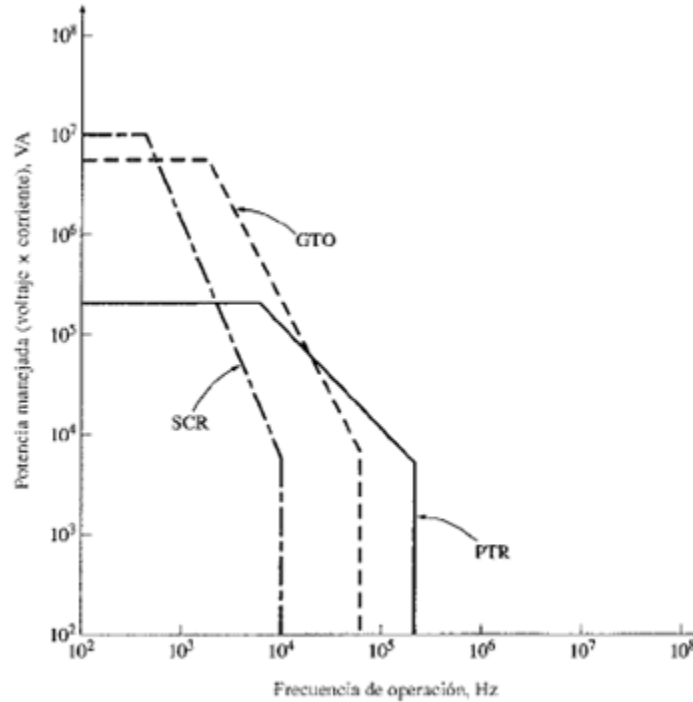


Fig. 3.23 Comparación de las velocidades relativas y capacidades de manejo de potencia de los SCR, los tiristores GTO y los transistores de potencia.

El valor rms de la parte alterna del voltaje de salida es más difícil de calcular, puesto que se debe sustraer primero la componente dc del voltaje. Sin embargo, el factor de rizado r puede calcularse mediante una fórmula diferente pero equivalente que no requiere el valor rms de la componente ac del voltaje. Esta fórmula para el rizado es

$$r = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{DC}}\right)^2} - 1 \times 100\%$$

Donde V_{rms} es el valor rms del voltaje total de salida del rectificador y V_{DC} es el voltaje de salida dc o promedio del rectificador.

El rectificador de media onda

La figura 3.24 muestra un rectificador de media onda y la Figura 3.25, su salida. El diodo conduce durante el semiciclo positivo y bloquea el flujo de corriente durante el semiciclo negativo. Un rectificador de media onda sencillo de esta clase, es una aproximación demasiado pobre a una onda dc constante: contiene componentes de frecuencia alterna a 60 Hz y todas sus armónicas. Un rectificador de media onda tal como el de la figura, tiene un factor de rizado $r=121\%$, lo cual significa que tiene más componentes de tensión alterna en su salida que componentes dc. Es claro que el rectificador de media onda es una forma muy pobre de producir un voltaje dc a partir de una fuente ac.

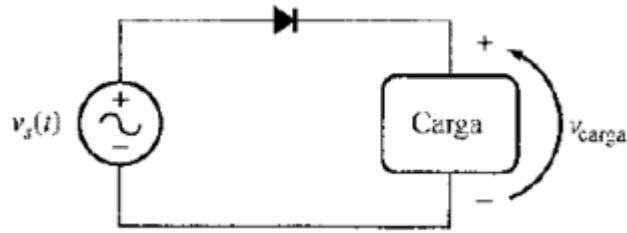


Fig.3.24 Circuito rectificador de media onda.

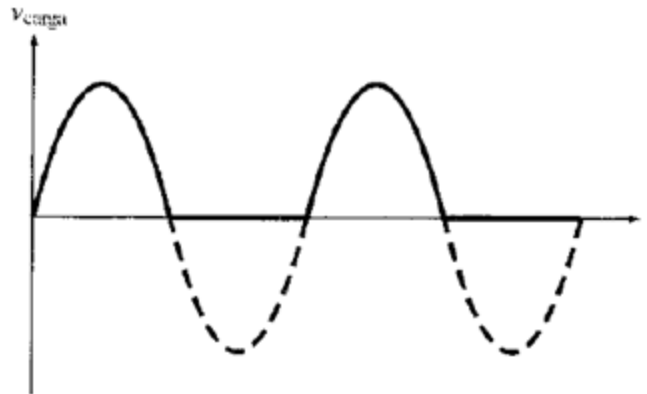
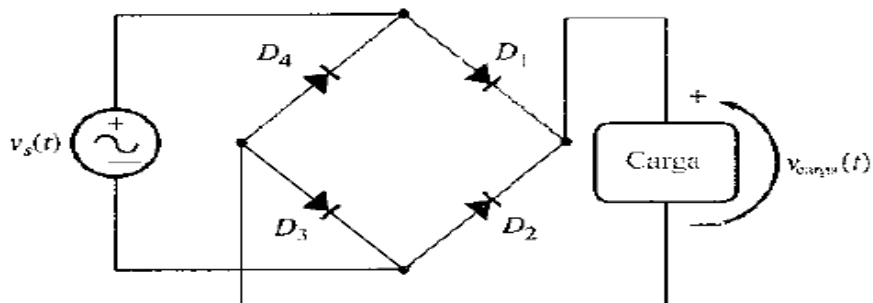


Fig.3.25 Voltaje de salida del circuito rectificador.

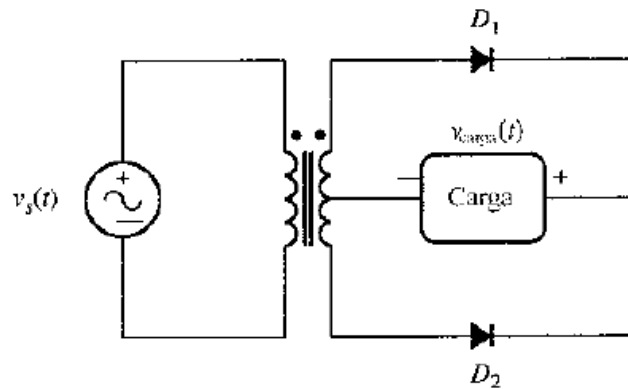
El rectificador de onda completa

La figura 3.26a muestra un circuito puente rectificador de onda completa y la figura 3.26c, su voltaje de salida. En este circuito, los diodos D_1 , y D_3 conducen durante el semiciclo positivo de la entrada ac, y los diodos D_2 , y D_4 , durante el semiciclo negativo. El voltaje de salida de este circuito es más plano que el voltaje de salida del rectificador de media onda pero contiene aún componentes de frecuencia alterna a 120 Hz y sus armónicas. El factor de rizado de un rectificador de onda completa de este tipo es $r= 48.2 \%$, mucho mejor que el del circuito rectificador de media onda.

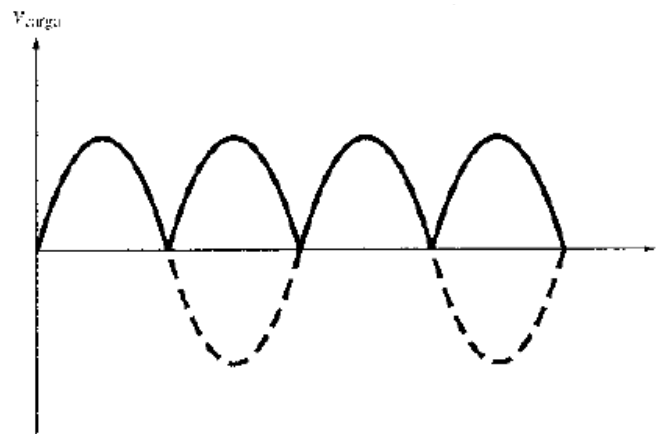
Otro circuito rectificador de onda completa posible se muestra en la figura 3.26b. En este circuito, el diodo D_1 , conduce durante el semiciclo positivo de la entrada ac con la corriente retornando a través de la toma central del transformador, y el diodo D_2 , conduce durante el semiciclo negativo de la entrada ac; la corriente retorna a través de la toma central del transformador. La onda de salida es idéntica a la mostrada en la figura 3.26c.



a) Puente rectificador de onda completa.



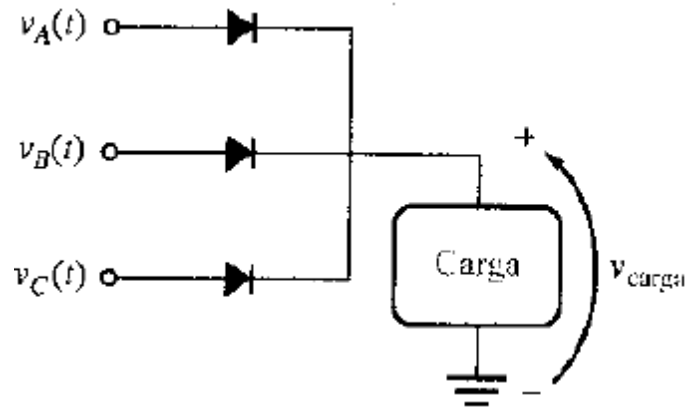
b) Circuito rectificador de onda completa utilizando diodos y un transformador con toma.



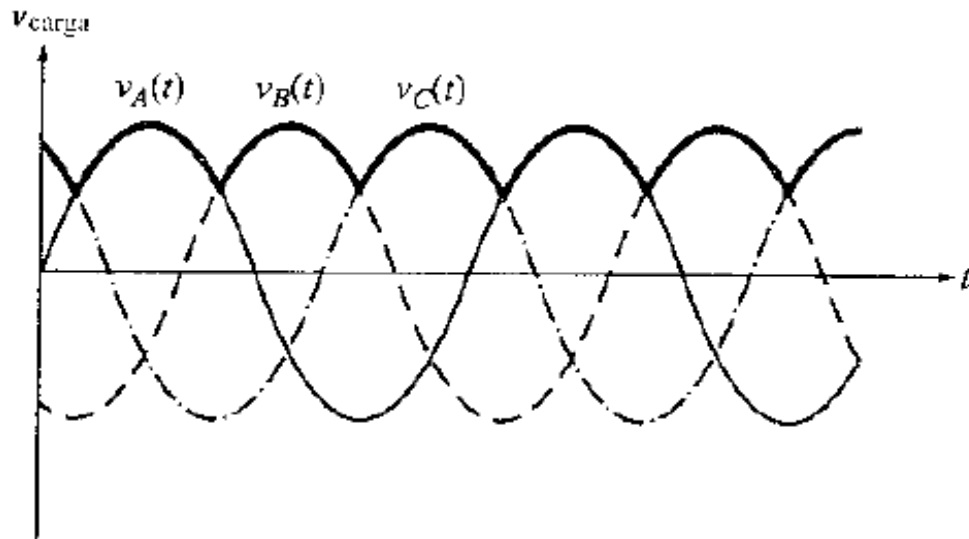
c) voltaje de salida del circuito rectificador.

Fig.3.26 Comparación de las velocidades relativas y capacidades de manejo de potencias de los SCR, los tiristores GTO y los transistores de potencia.
Rectificador trifásico de media onda

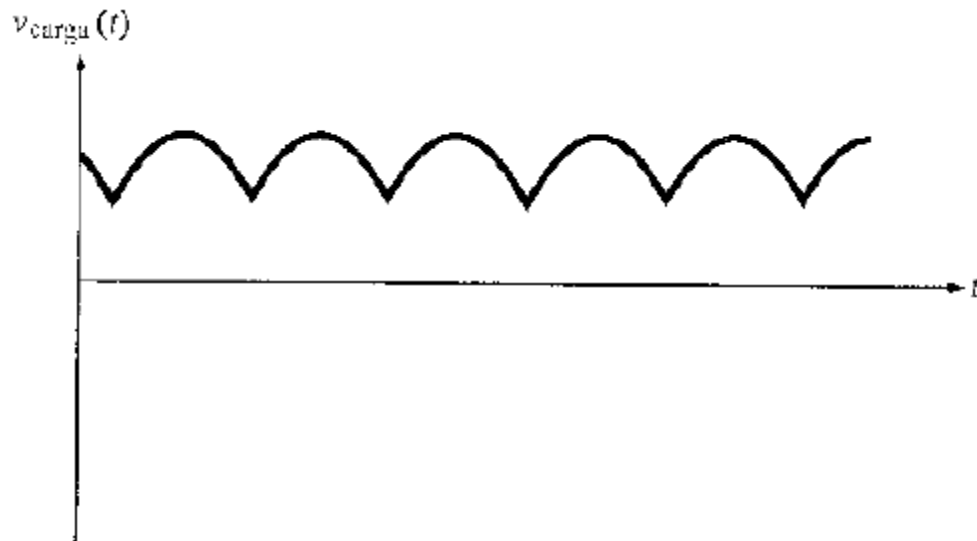
La figura 3.27a muestra un rectificador trifásico de media onda. El efecto de tener tres diodos con sus cátodos conectados a un punto común es que en cualquier instante conduce el diodo al cual se le aplica el voltaje más alto, y los otros dos diodos tendrán polarización inversa. En la figura 3.27b se muestran los voltajes trifásicos aplicados al circuito rectificador; el voltaje de salida resultante se muestra en la figura 3.27c. Nótese que el voltaje en la salida del rectificador en cualquier tiempo es justamente el mayor de los tres voltajes de entrada en ese momento. Este voltaje de salida es casi tan plano como el del circuito puente rectificador de onda completa y contiene componentes de voltaje ac a 180 Hz y sus armónicas. El factor de rizado para un rectificador de este tipo es 18.3 %.



a) Circuito rectificador trifásico de media onda.



b) Voltajes trifásicos de entrada al circuito rectificador.



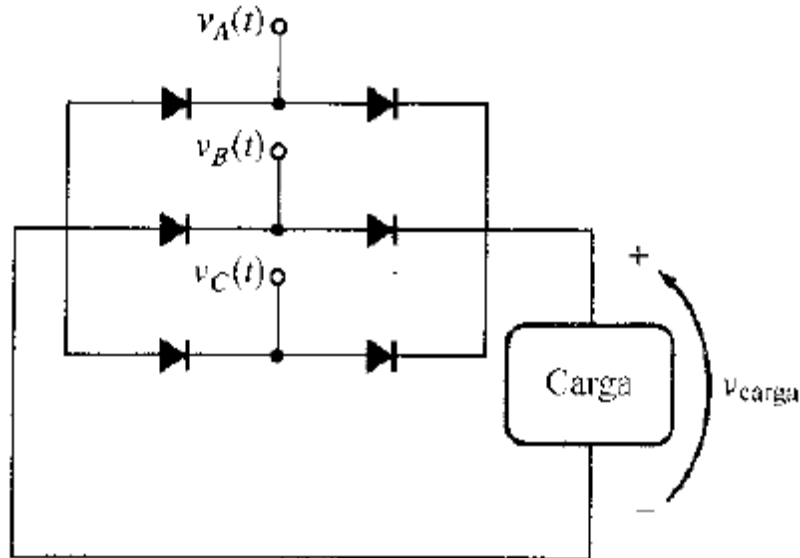
c) Voltaje de salida al circuito rectificador.

Fig. 3.27 Rectificador trifásico de media onda.

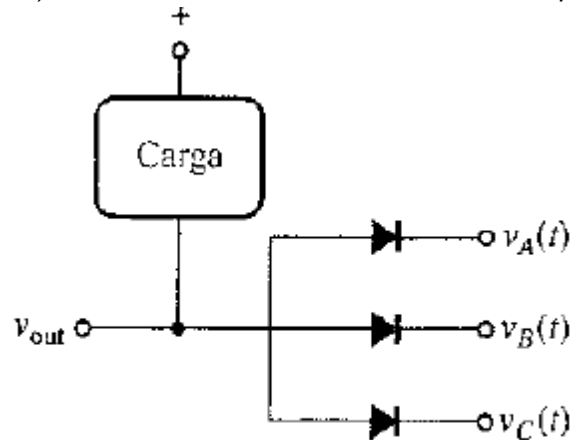


Rectificador trifásico de onda completa

La figura 3.28a muestra un rectificador trifásico de onda completa. Básicamente, un circuito rectificador de este tipo puede dividirse en 2 componentes. Una parte del circuito se ve como el rectificador trifásico de media onda de la figura 3.27 y sirve para conectar a la carga, en cualquier momento, el voltaje más alto de los voltajes trifásicos.



a) Circuito rectificador trifásico de onda completa.



$$v_{out} = \text{El más bajo de } v_A, v_B, \text{ o } v_C$$

b) Este circuito coloca en su salida los puntos más bajos de sus tres voltajes de entrada.

Fig. 3.28 Rectificador trifásico de onda completa.

3.2.3 Circuitos de pulsos.

Los SCR, los tiristores GTO y los TRIAC descritos en la sección son encendidos mediante la aplicación de un pulso de corriente a sus circuitos de potencia. Para construir los controladores de potencia, es necesario recurrir a algún método de



producción y aplicación de pulsos a las puertas de tales dispositivos en el momento adecuado para encenderlos (así mismo, es necesario recurrir a algún método de producción y aplicación de pulsos negativos a las puertas de los tiristores GTO en el momento adecuado para apagarlos).

Figura 3-20

- a) Los voltajes más altos y más bajos de un rectificador trifásico de onda completa.
- b) Voltaje de salida resultante.

Para producir pulsos de voltaje y de corriente se dispone de muchas técnicas que podrían clasificarse en dos amplias categorías: análogos y digitales. Los circuitos análogos de generación de pulsos se han utilizado desde el nacimiento de los controles de estado sólido para máquinas. Cuentan con dispositivos tales como los diodos PNPN, que tienen características voltaje-corriente con regiones

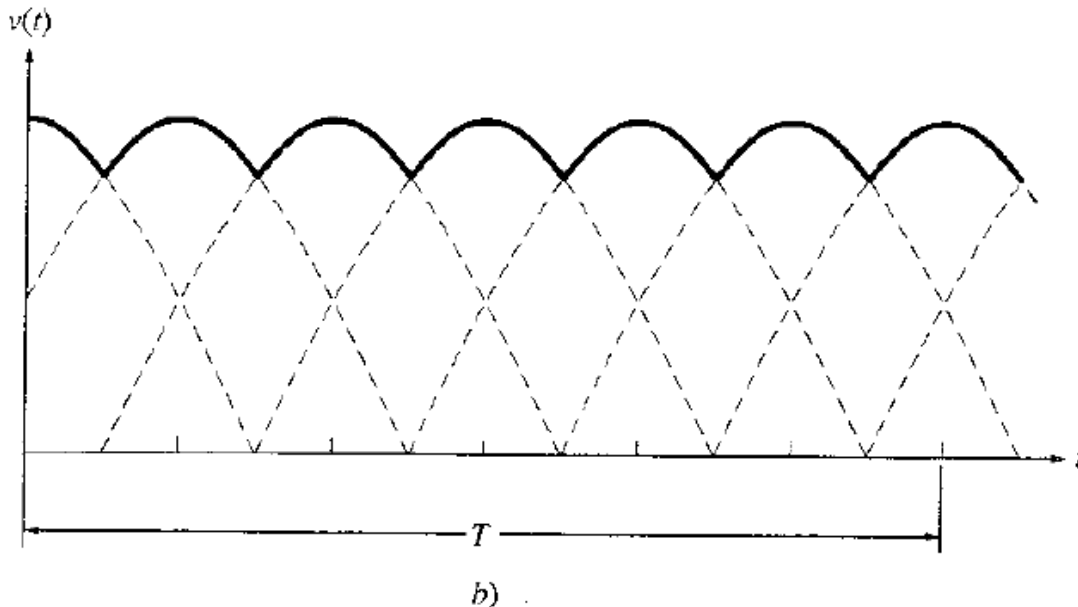


Fig.2.29 a) Los voltajes más altos y más bajos en un rectificador trifásico de onda completa, b) Voltaje de salida resultante.

Discretas de no conducción y de conducción. La transición de una región de no conducción a una región de conducción en el dispositivo (o viceversa) se utiliza para generar los pulsos de voltaje y de corriente. En esta sección se describen algunos circuitos sencillos análogos de generación de pulsos. Estos circuitos se conocen en conjunto como osciladores de relajación.

Los circuitos digitales de generación de pulsos son de uso muy común en los accionamientos modernos de estado sólido para motores. Normalmente contienen un microcomputador que ejecuta un programa almacenado en la memoria de solo lectura (ROM). El programa de computador puede considerar muchas entradas diferentes para decidir acerca del tiempo adecuado de generar los pulsos de encendido. Por la razón a la cual está acelerando y desacelerando y cualquier otro límite de voltaje o corriente especificados para la determinación del tiempo de



generación de los pulsos. Las entradas que él considera y el peso relativo que les aplica pueden ser cambiados mediante interruptores situados en la placa del circuito impreso del microcomputador; de esta manera, los controladores de estado sólido para motores se vuelven muy flexibles con generadores digitales de pulsos. Un tablero de circuitos típico de un generador digital de pulsos de un control de ancho de pulso modulado para motor de inducción se muestra en la figura 3.31. Motores de corriente alterna y de corriente continua que contienen tales circuitos digitales de encendido. La producción de pulsos para activar SCR, GTO y TRIAC es uno de los aspectos más complejos del control de potencia de estado sólido. Los circuitos análogos sencillos aquí mostrados son ejemplos de los tipos más primitivos de circuitos de producción de pulsos.

Oscilador de relajación que utiliza un diodo PNP

Un oscilador de relajación o un circuito generador de pulsos construido con un diodo PNP. Para que este circuito trabaje, deben darse las siguientes Condiciones:

1. El voltaje de la fuente de suministro V_{DC} debe exceder el V_{BO} del diodo PNP.
2. V_{DC}/R_1 debe ser menor que I_H para el diodo PNP.
3. R_1 debe ser mayor que R_2 .

Cuando se cierra por primera vez el interruptor del circuito, se carga el condensador C a través de R_1 con una constante de tiempo $t = R_1C$ como el voltaje en el condensador aumentará excederá eventualmente a V_{BO} y el diodo PNP se encenderá. Una vez que el diodo PNP se enciende, el condensador descarga a través de aquel; la descarga es muy rápida debido a que la resistencia R_2 es muy pequeña comparada con R_1 . Una vez que el condensador se descarga, el diodo PNP se descargara puesto que la corriente de estado estacionario que fluye a través de R_1 es menor que I_H del diodo PNP.

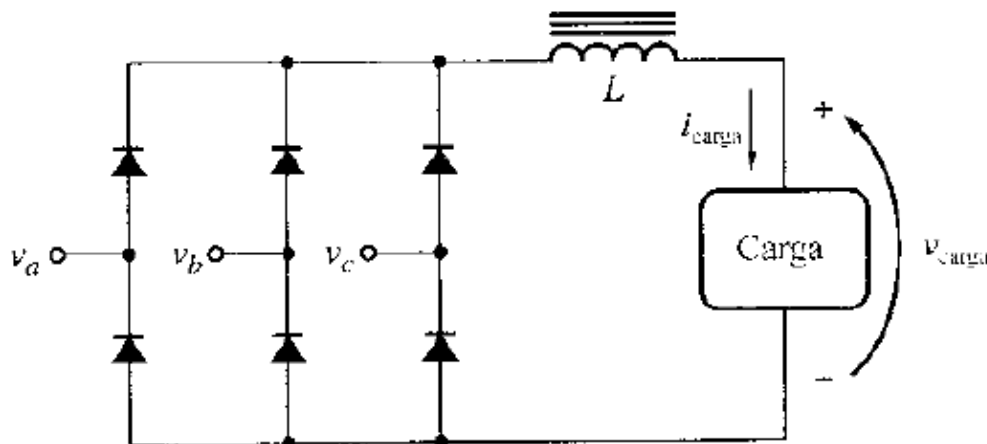


Figura 3.30 Circuito puente rectificador de onda completa con filtro inductivo para disminuir el rizado en la salida.



Fig.3.31 Placa típica del generador digital de pulsos de un accionamiento de pulso de anchura modulada (PWM), para un motor de inducción (cortesía de magneTek drivers and systems).

La distribución de estos pulsos puede ser variada, si varía R_1 . Suponga que se reduce el valor de R_1 ; entonces el condensador cargará más rápidamente y el diodo PNP se activará más pronto. La sucesión de pulsos ocurrirá a intervalos menores. Este circuito puede utilizarse para activar directamente un SCR quitando R_2 y conectando el terminal de puerta del SCR en su lugar. Alternativamente, el circuito de pulsos puede ser acoplado al SCR a través de un transformador, como lo muestra. Si se requiere más corriente de puerta para manejo del SCR o el TRIAC, el pulso puede ser amplificado por una etapa transistorizada extra. El mismo circuito básico puede ser construido utilizando un DIAC en cambio del diodo PNP. Este funciona en la misma forma descrita.

Sincronización de pulsos

En aplicaciones de corriente alterna es muy importante que el pulso de disparo se aplique en el mismo punto a los SCR controladores en cada ciclo ac. Esto se logra sincronizando el circuito de pulsos con la línea de potencia que alimenta a los SCR. Esto se puede llevar a cabo con facilidad haciendo que la fuente que alimenta al circuito de disparo se a igual a la que alimenta a los SCR.

Si el circuito de disparo se alimenta de un semiciclo de la línea de corriente alterna, el circuito RC siempre comenzará a cargarse exactamente al comienzo del ciclo, de modo que el pulso ocurrirá siempre a un tiempo fijo con respecto al comienzo del ciclo.

3.2.4 Variación de voltaje mediante control de fase ac.

El nivel de voltaje aplicado es una de las variables más comunes en aplicaciones de controles de motores. El SCR y el TRIAC proveen una técnica conveniente



para controlar el voltaje medio aplicado a una carga: cambiar el ángulo de fase a que se aplica la fuente de voltaje.

Control de fase ac para una carga dc alimentada por una fuente ac

La Figura 3.32 ilustra el concepto de control de ángulo de fase de potencia. La figura muestra un circuito de control de fase de voltaje con una carga dc resistiva, alimentada por una fuente de corriente alterna. En él Circuito, El SCR tiene un voltaje de transición conductiva para $I_G = 0 A$ mayor que el voltaje más alto del circuito, mientras que el diodo PNP tiene un voltaje de transición conductiva muy bajo. Quizás 10 V o parecido. El circuito puente de onda completa asegura que el voltaje aplicado al SCR y la carga sea siempre dc.

Si el interruptor S_1 en la figura está abierto, el voltaje V_1 en los terminales del rectificador será justamente una versión rectificadora del voltaje de onda completa de la entrada (véase figura 3.33). Si se cierra el interruptor S_1 y se deja abierta S_2 , el SCR siempre estará apagado. Esto es cierto puesto que el voltaje de salida del rectificador nunca excederá a V_{BO} , para el SCR. Puesto que el SCR funcionaría siempre como un circuito abierto, la corriente que fluye a través de él y de la carga y, por consiguiente, el voltaje en la carga serán cero. Si el interruptor S_2 , se cierra, al comienzo del primer semiciclo después del cierre del interruptor. Se genera un voltaje a través de la red RC y el condensador comienza a cargarse. Durante el tiempo de carga del condensador, el SCR permanece apagado mientras el voltaje que se le aplica, no exceda V_{BO} . Con el paso del tiempo, el condensador se carga hasta alcanzar el voltaje de transición conductiva del diodo PNP y éste empieza a conducir la corriente. El flujo de corriente del condensador y el diodo PNP pasa a través de la puerta del SCR, bajando el voltaje V_{BO} en el SCR y encendiéndolo. Cuando el SCR se enciende, fluye corriente a través de él y de la carga. Este flujo continúa durante el resto del semiciclo, aún después de que el condensador ha sido descargado, puesto que el SCR sólo se apaga cuando su corriente cae por debajo de su valor de sostenimiento (dado que I_H es de unos pocos mili amperes, eso no ocurre sino hasta el extremo final del semiciclo). Al comienzo del siguiente semiciclo, el SCR se apaga de nuevo. El circuito XC carga durante un periodo finito y dispara el diodo PNP que, una vez más, envía corriente a la puerta del SCR, encendiéndolo. Una vez encendido, el SCR permanece así durante el resto del ciclo. La figura 3.34 muestra las ondas de voltaje y de corriente de este circuito. Ahora, surge la pregunta crítica: como puede cambiarse la potencia suministrada a la carga. Suponga que el valor dc disminuye. Entonces, al principio de cada semiciclo, el condensador se carga más rápidamente el SCR se disparará más pronto. Puesto que el SCR estará encendido durante más tiempo en el semiciclo, se suministra más a la carga (vease figura 3.35). El resistor R en este circuito controla el flujo de potencia que va a la carga. La potencia suministrada a la carga es una función del tiempo de disparo del SCR; cuanto más temprano se dispare éste, más potencia será suministrada. Es costumbre expresar el tiempo de disparo del SCR como ángulo de disparo, donde el ángulo de disparo es el ángulo del voltaje sinusoidal aplicado en el momento del disparo. La relación entre el ángulo de disparo.

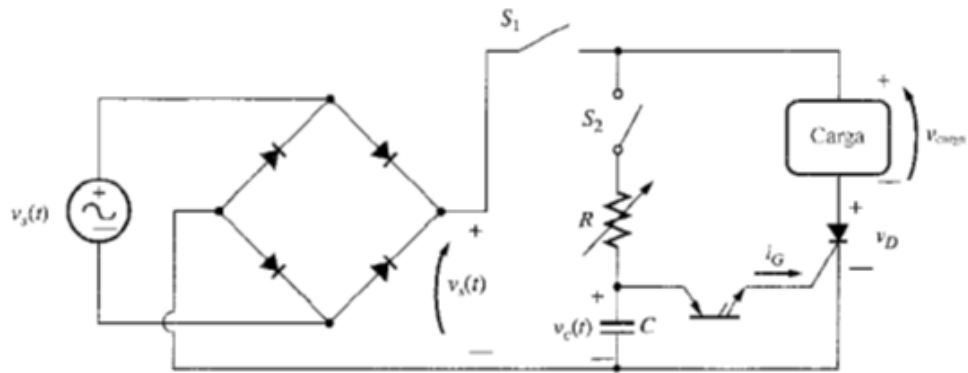


Fig.3.32 circuito de control de voltaje para una carga dc, por control de angulo de fase.

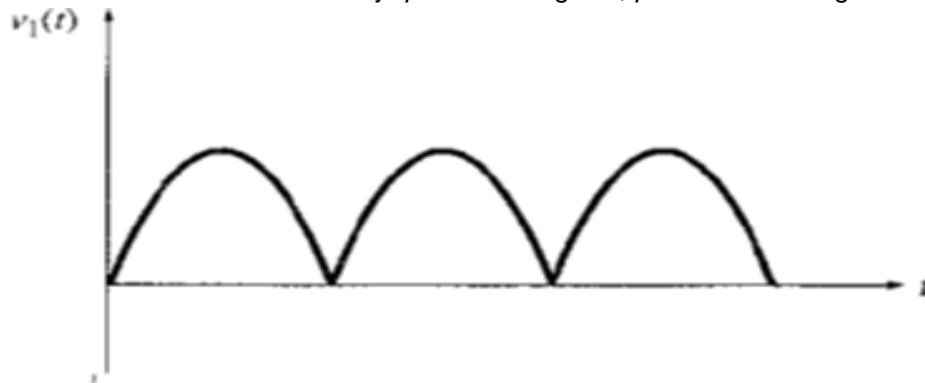
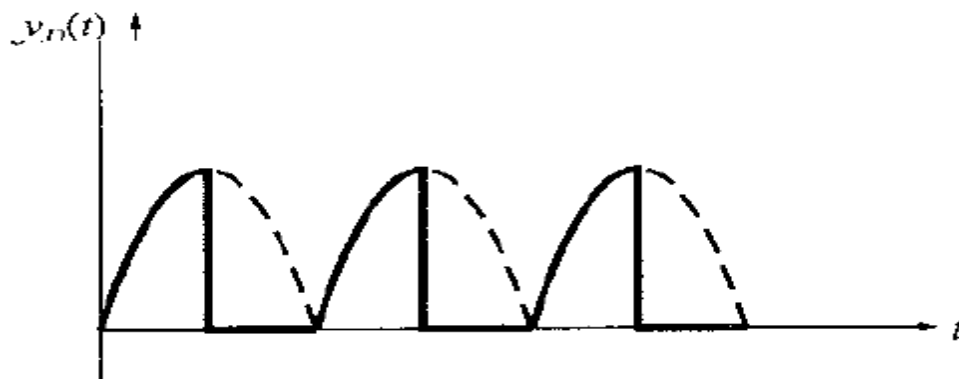
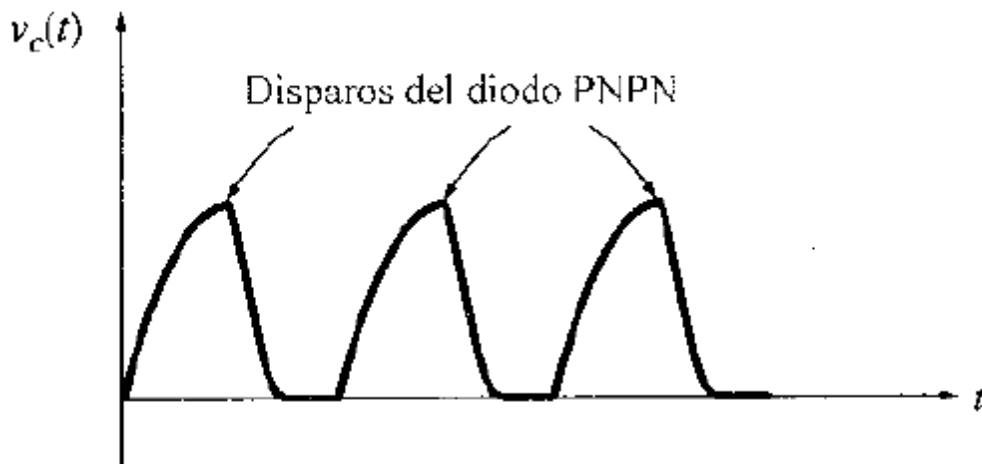


Fig.3.33 voltaje en la salida del circuito puente con el interruptor S_1 abierto.



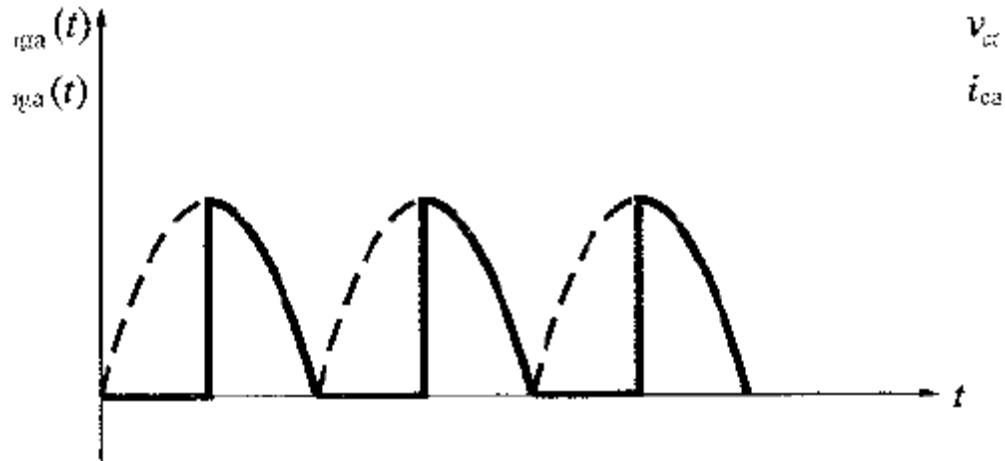


Figura 3.34 voltaje a través del condensador SCR y carga y, corriente a través de la carga cuando los interruptores S_1 y S_2 están cerrados.

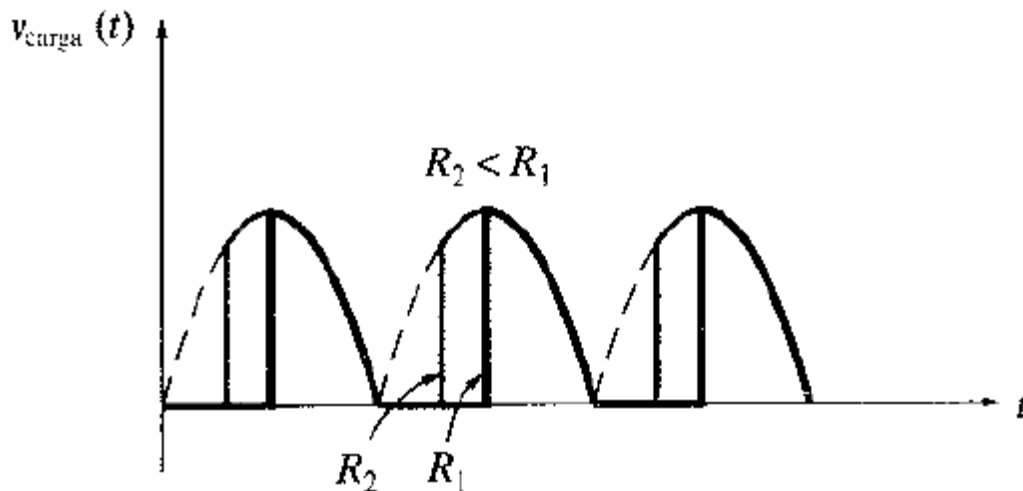
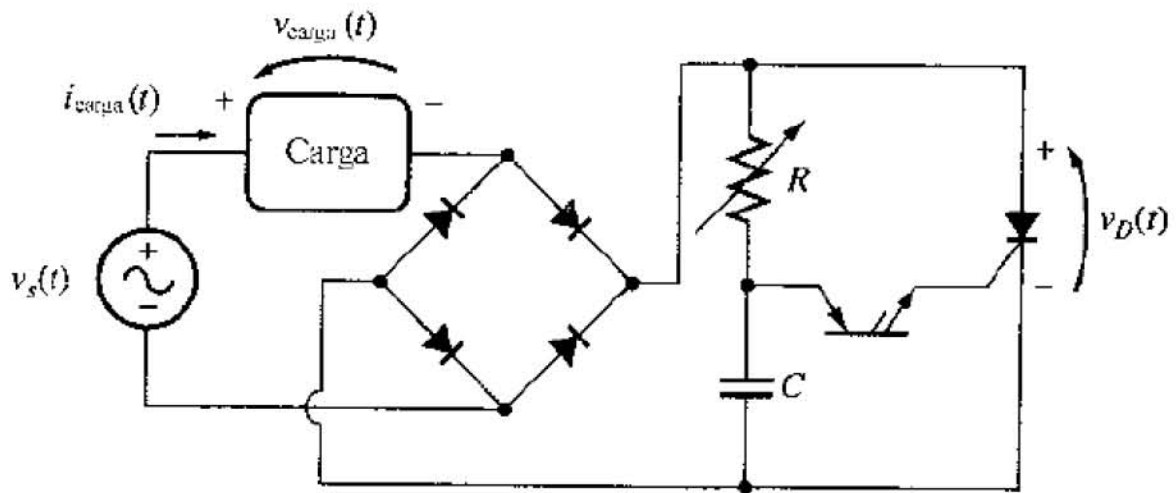


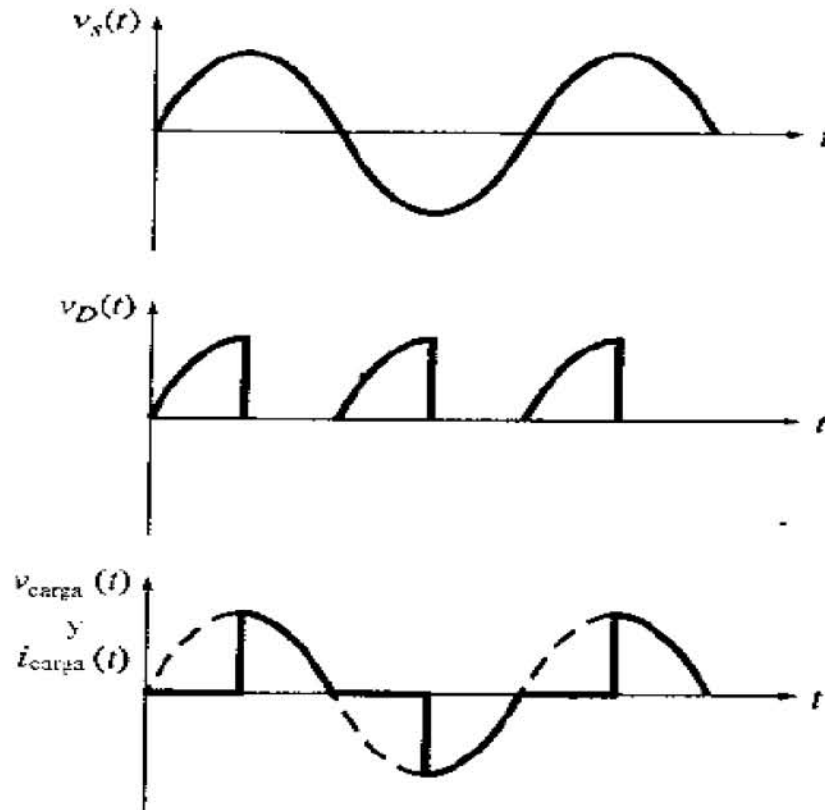
Fig.3.35 Efecto de disminuir R sobre el voltaje de salida aplicado a la carga. Control de ángulo de fase ac para una carga ac.

La figura 3.36a muestra el circuito resultante y, la figura 3.36b muestra su voltaje y las formas de las ondas del circuito.

Sin embargo, hay una forma mucho más fácil de elaborar un controlador de potencia ac. Si se utiliza el mismo circuito básico, con un DIAC en cambio del diodo PNP y un TRIAC en lugar del SCR, el circuito puente de diodos puede ser sacado completamente del circuito. Puesto que tanto el DIAC como el TRIAC son elementos de dos vías, operan igualmente bien en cada semíciclo de la fuente ac. En la figura 3.37 se muestra un controlador de fase de potencia ac con un DIAC y un TRIAC.



a)



b)

Figura 3.36 a) Circuito de control de voltaje para una carga ac por control de ángulo de fase. b) Voltajes en la fuente, la carga y el SCR en este controlador.

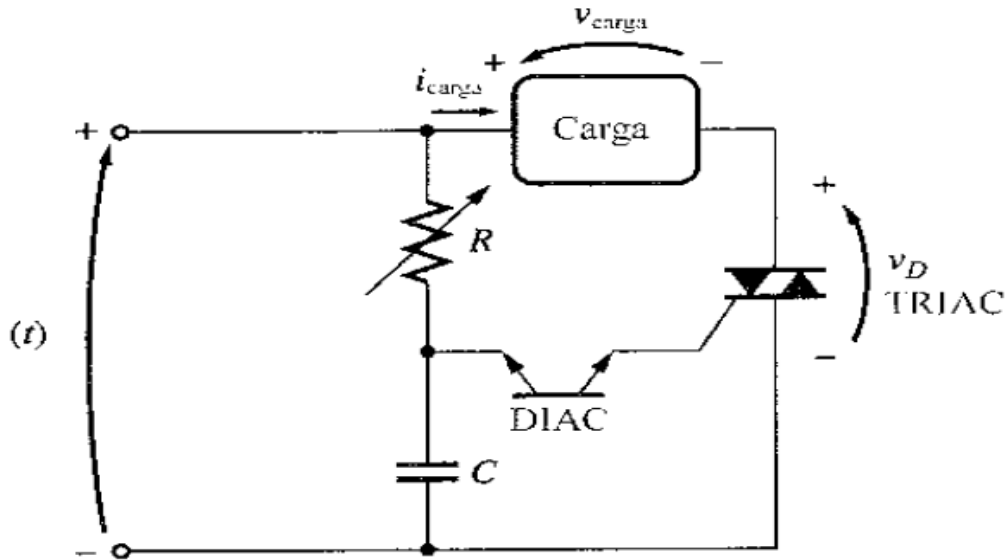


Fig.3.37 Controlador de Angulo de fase utilizando un DIAC y un TRIAC.

Efecto de cargas inductivas sobre el control de ángulo de fase

Si la carga colocada a un controlador de ángulo de fase es inductiva (como lo son las máquinas reales), entonces se introducen nuevas complicaciones en la operación del controlador. Por la naturaleza de la inductancia en una carga inductiva, la corriente no puede cambiar fácilmente. Esto significa que la corriente suministrada a la carga no crecerá tan pronto se encienda el SCR (o TRIAC) ni tampoco se detendrá exactamente al final del semiciclo. Al final del semiciclo, el voltaje inductivo en la carga mantendrá encendido el dispositivo durante algún tiempo en el siguiente semiciclo hasta que la corriente que fluye a través de la carga y del SCR caiga por debajo de I_H . La figura 3.40 muestra el efecto de este atraso en las ondas del voltaje y la corriente para el circuito de la figura 3.36.

Una inductancia grande en la carga puede causar dos problemas potencialmente graves con un controlador de fase:

1. La inductancia puede causar que la corriente generada después que el SCR se enciende sea tan lenta que no le permita exceder la corriente de sostenimiento antes que desaparezca la corriente de la puerta. Si esto ocurre, el SCR no permanecerá encendido puesto que su corriente es menor que I_H .
2. Si la corriente continua durante largo tiempo antes de decaer a I_H , después del final de un ciclo dado, el voltaje aplicado podría crecer suficientemente en el próximo ciclo para mantener el flujo de corriente, y el SCR nunca se apagaría.

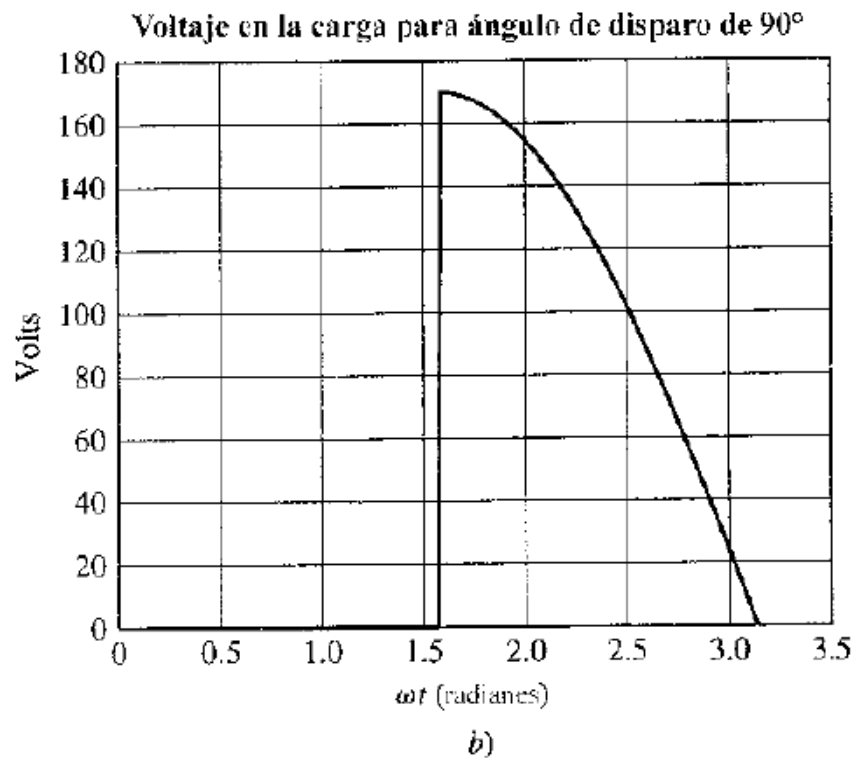
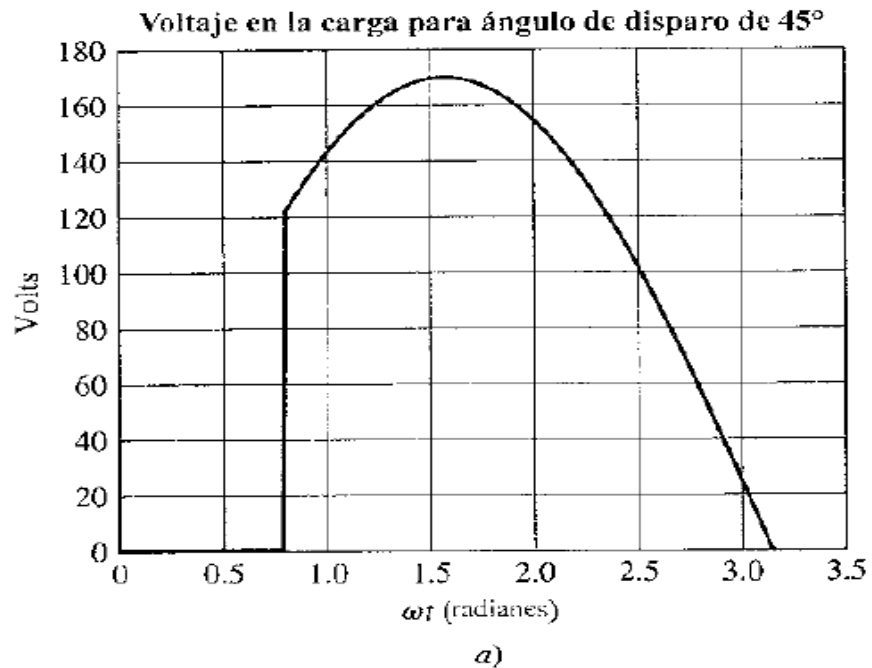


Fig.3.38 onda producida por voltios vs ángulo de fase para un ángulo de fase a) 45° , b) 90° .

La solución normal para el primer problema es utilizar un circuito especial para proveer un pulso más largo de corriente de puerta al SCR. Este pulso más largo deja bastante tiempo para que la corriente del SCR supere el nivel de I_H , permitiendo que el dispositivo permanezca encendido durante el resto del semiciclo. Una solución para el segundo problema es adicionar un diodo de



marcha libre, un diodo colocado a través de la carga y orientado de modo que no conduce durante el flujo normal de corriente, la figura 3.41 muestra este diodo. Al final del semiciclo la corriente de la carga inductiva intentara mantener el flujo en la misma dirección que traía. Para ello se creara un voltaje en la carga, con polaridad requerida para mantener el flujo de corriente. Este voltaje polarizara en dirección positiva al diodo volante y suministrara un camino para la corriente de descarga desde la carga, de esta forma, el SCR puede apagarse sin que la corriente del inductor caiga instantáneamente a cero.

3.2.5 Control de potencia dc a dc: recortadores.

A veces es deseable variar el voltaje disponible de una fuente dc antes de aplicarlo a la carga. Los circuitos que permiten variar el voltaje de una fuente dc se llaman convertidores dc a dc o recortadores. En un circuito recortador, el voltaje de entrada es una fuente de voltaje constante y el voltaje de salida varia cambiando la fracción del tiempo que la fuente dc está conectada a la carga. La figura 3.43 muestra el principio básico de un circuito recortador.

Cuando el SCR se dispara, se enciende y se suministra potencia a la carga. Cuando se apaga, la fuente dc es desconectada de la carga.

En el circuito mostrado en la figura 3.43, la carga es una resistencia cuyo voltaje es V_{DC} ó 0. De la misma manera la corriente de la carga es V_{DC}/R ó 0. Es posible suavizar la ondulación del voltaje y corriente de salida adicionando un inductor en serie para filtrar algunas de las componentes ac de la onda. La figura 3.44 muestra un circuito recortador con un filtro inductivo. La corriente atreves del inductor se incrementa exponencialmente cuando el SCR esta encendido, y decrece exponencialmente cuando el SCR está apagado. Si el inductor es grande, los cambios de la contante de tiempo de la corriente ($\tau = L/R$) estarán fuertemente relacionados con el ciclo de encendido/apagado del SCR, y el voltaje y la corriente de la carga serán casi constantes en un valor medio.

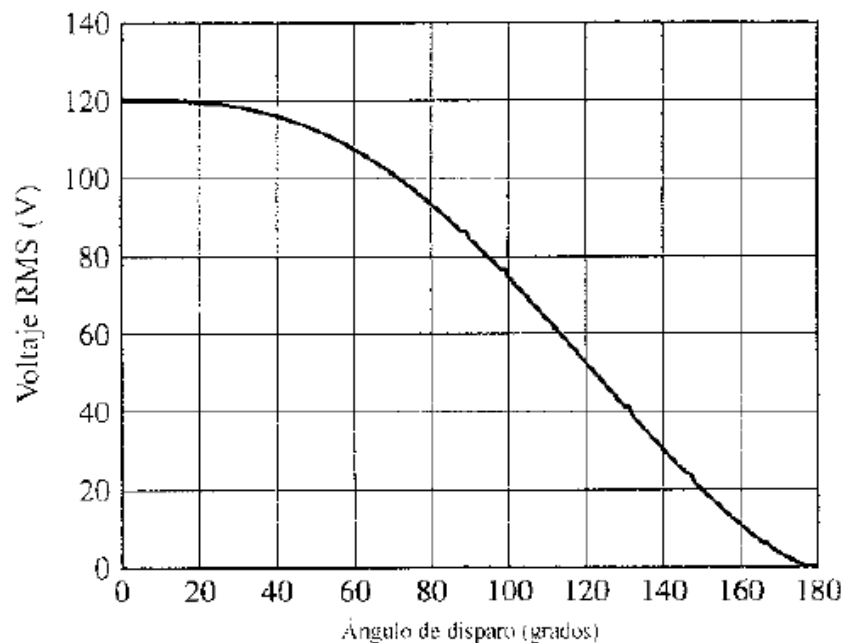


Fig.3.39 dibujo del voltaje rms de carga contra ángulo de disparo del TRIAC.

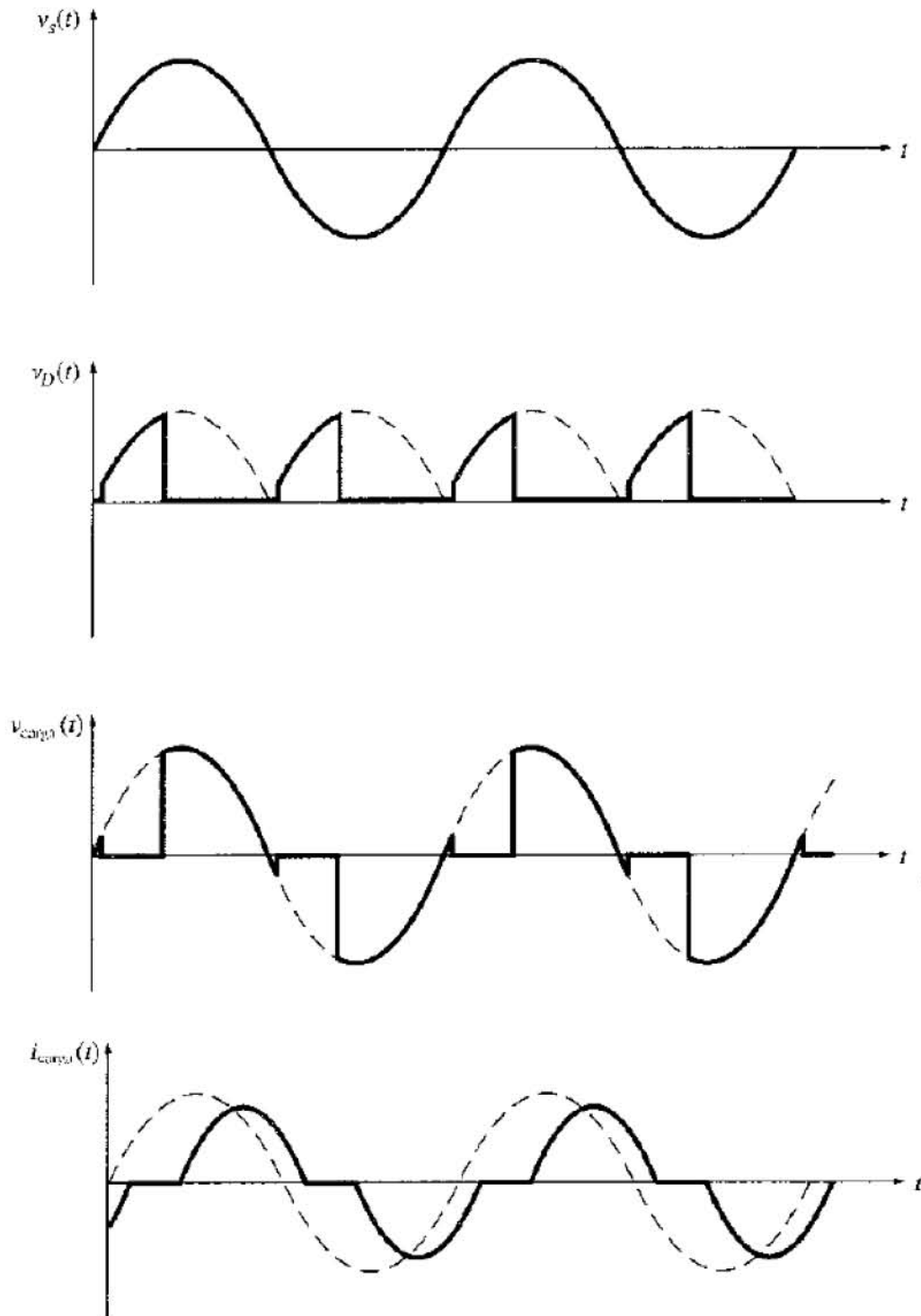


Fig.3.40 efecto de una carga inductiva sobre las ondas de voltaje y corriente del circuito mostrado en la figura 3.32.

En el caso de los controladores de fase ac, los SCR se apagan de modo automático al final de cada semiciclo cuando sus corrientes caen a cero. Para los circuitos dc, no hay un punto en el cual la corriente caiga naturalmente por debajo de I_H , una vez encendido el SCR, nunca se apaga. Para apagar de nuevo el SCR



al final de un pulso, es necesario aplicarle un voltaje inverso durante un corto tiempo. Este voltaje inverso detiene el flujo de corriente y apaga el SCR. Una vez que éste se ha apagado, no se encendería de nuevo hasta que otro pulso llegue a la puerta del SCR. El proceso de forzar el apagado del SCR en un tiempo determinado se conoce como conmutación forzada.

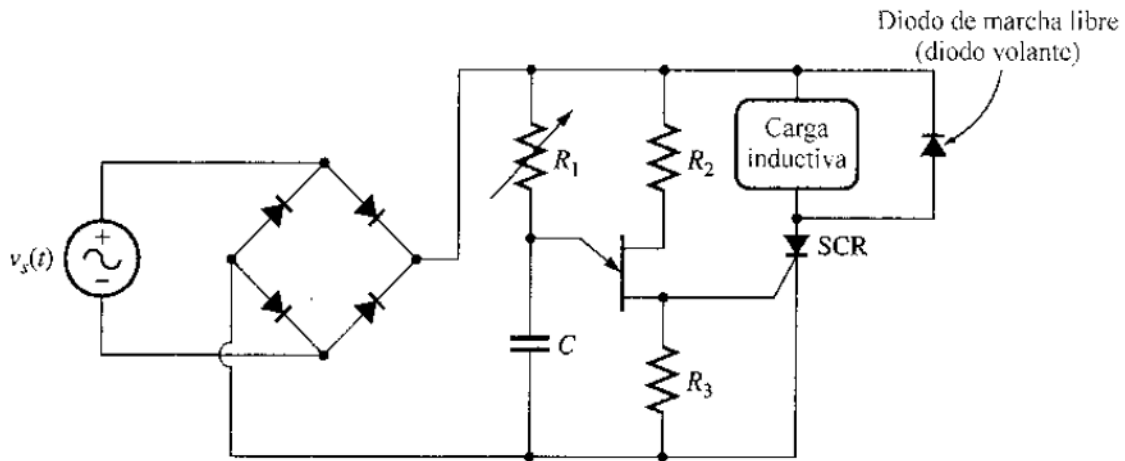


Figura 3.41 controlador de ángulo de fase que ilustra la utilización de un diodo de marcha libre con carga inductiva.

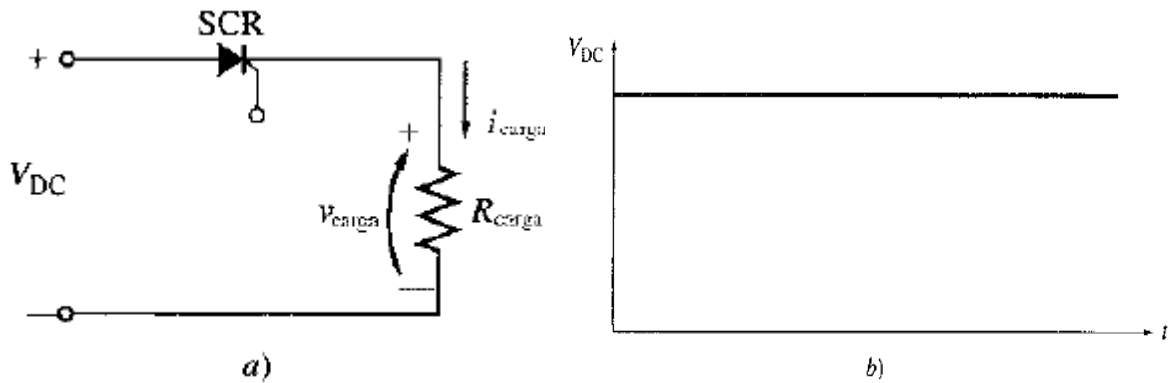


Fig. 3.42. a) principio básico de un circuito recortador. b) voltaje de entrada al circuito.

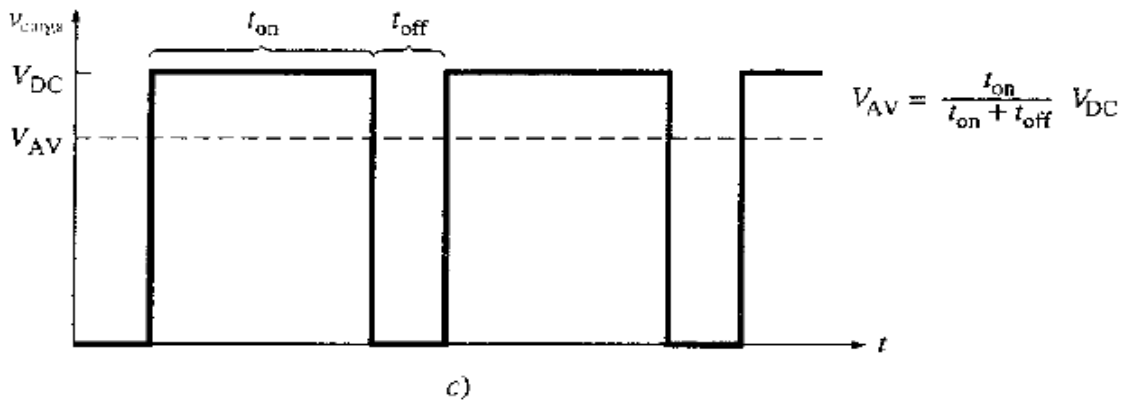


Fig. 3.43 c) voltaje resultante en la carga (circuito recortador).

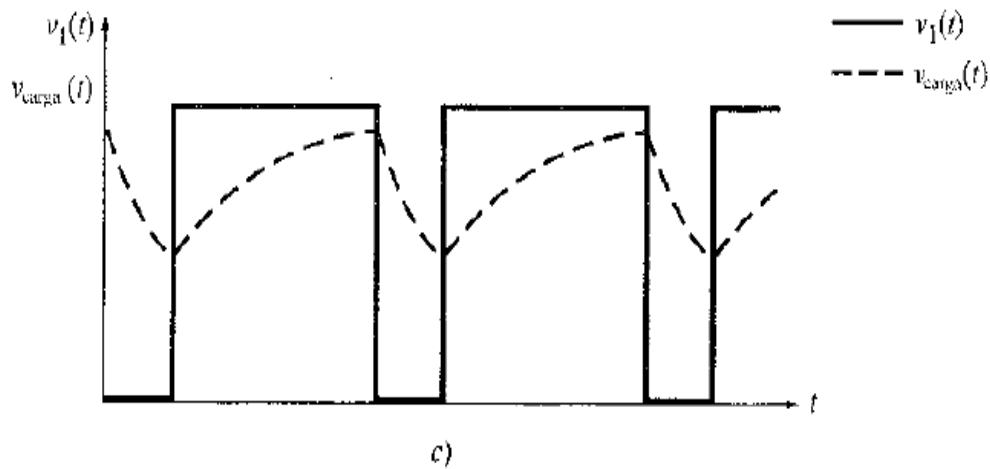
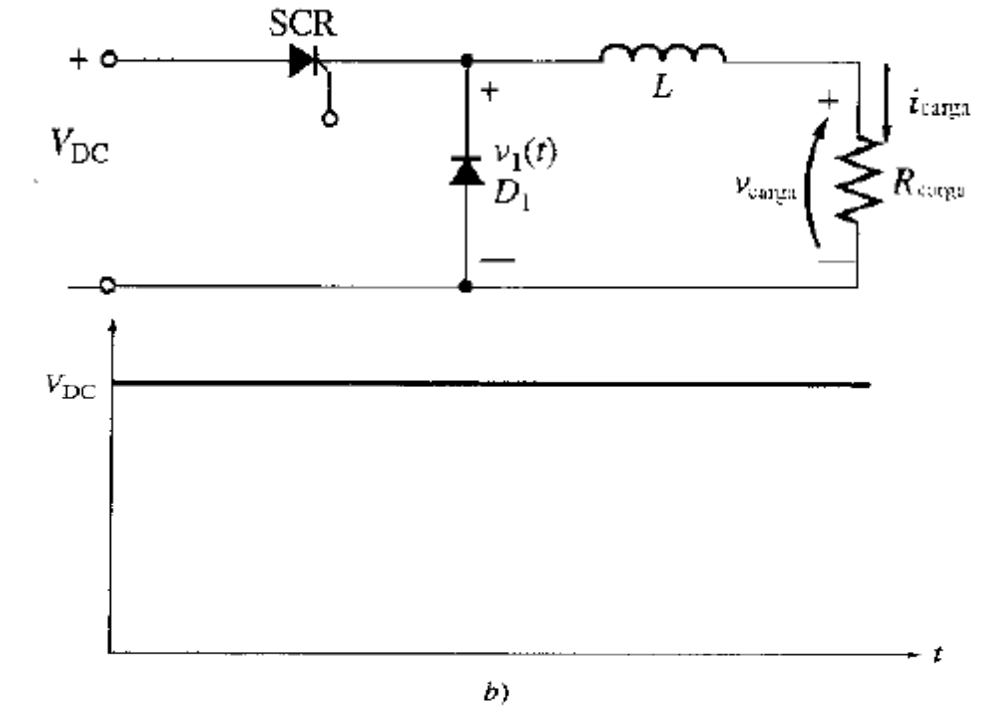


Fig.3.44 circuito recortador con un filtro inductivo para suavizar la ondulación del voltaje y la corriente en la carga.

Los tiristores GTO son adecuados idealmente para utilizar en los circuitos recortadores puesto que son autoconmutantes. En contraste con los SCR los GTO pueden ser apagados por un pulso negativo de corriente aplicado a sus puertas. En consecuencia, el circuito extra necesario en un circuito recortador SCR para apagar el SCR. Puede ser eliminado de un circuito recortador con tiristor GTO (figura 3.45a). Los transistores de potencia también son autoconmutantes y se utilizan en circuitos recortadores siempre que se encuentren dentro de sus límites de potencia. (Figura 3.45b).

Los circuitos recortadores se utilizan con los sistemas de potencia dc para variar la velocidad de los motores dc. Su mayor ventaja es el control dc de velocidad,



comparado con los métodos convencionales, es que son más eficientes que estos sistemas.

Conmutación forzada en circuitos recortadores

Cuando se utilizan SCR en circuitos recortadores, se debe incluir un circuito de conmutación forzada para apagar los SCR en el tiempo requerido. La mayoría de estos circuitos de conmutación forzada dependen, para su tensión de apagado, de un condensador cargado. A continuación se examinan brevemente dos versiones de conmutación con condensador:

1. Circuitos de conmutación con condensador en serie
2. Circuitos de conmutación con condensador en paralelo

Circuitos de conmutación con condensador en serie

La figura 3.46 muestra un circuito recortador dc sencillo con conmutación de condensador en serie. Se compone de un SCR, un condensador y una carga en serie. El condensador tiene una resistencia de descarga en paralelo; la carga, un diodo de marcha libre en paralelo.

El SCR se enciende al principio con un pulso aplicado a su puerta. Cuando el SCR se enciende. Se aplica una tensión a la carga y la corriente comienza a fluir a través de ella. Pero esta corriente fluye a través del condensador serie en la vía de la carga, y éste se carga gradualmente.

Cuando el voltaje del condensador se acerca a V_{DC} , la corriente del SCR cae por debajo de I_H y el SCR apaga.

Una vez que el condensador apaga al SCR, se descarga de manera gradual a través de la resistencia d. Cuando se encuentra totalmente descargado, el SCR está listo para ser disparado por otro pulso en la puerta. La figura 3.47 muestra las ondas de voltaje y corriente de este circuito.

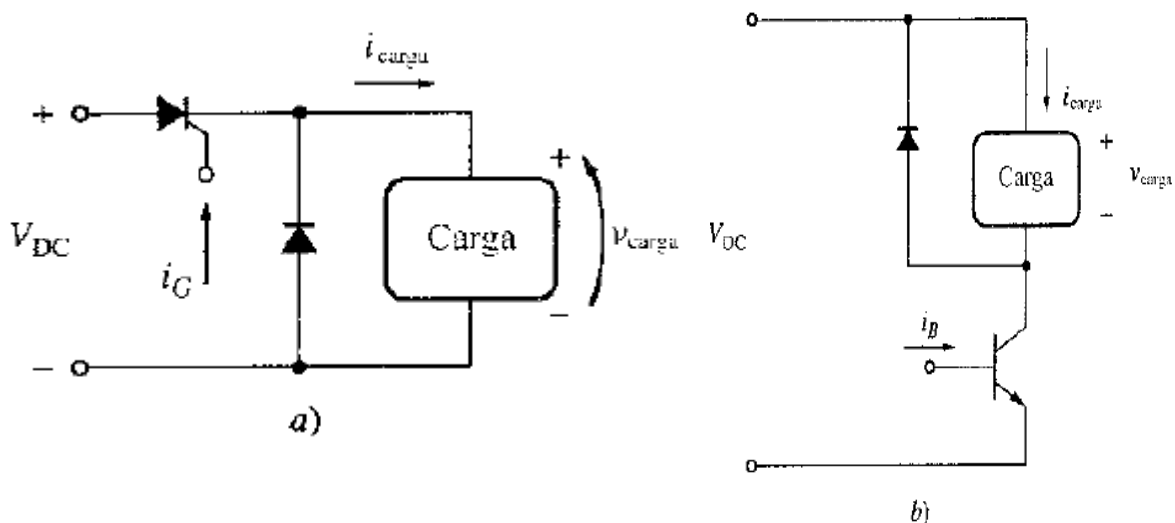


Fig.3.45 a) circuito recortador con tiristor GTO. b) circuito recortador con hecho con un transistor.

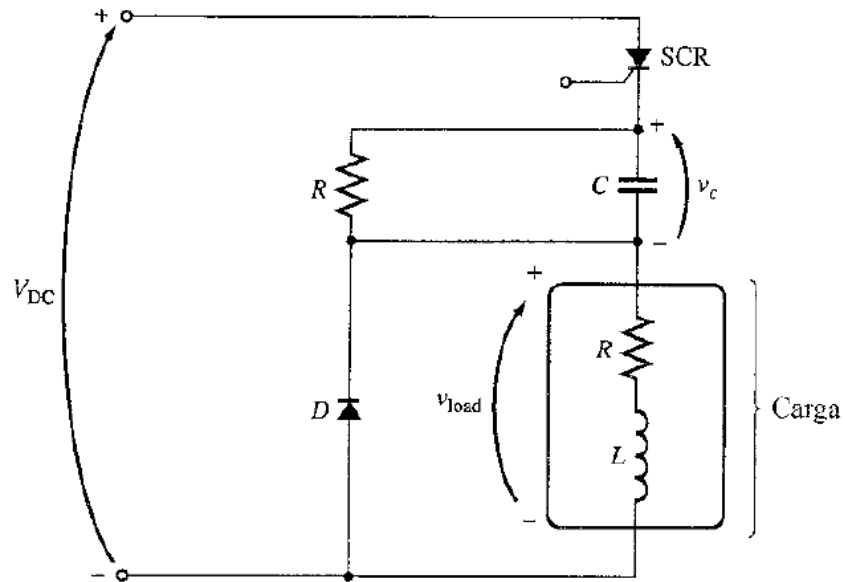


Fig. 3.46 circuito recortador de conmutación forzada con condensador en serie.

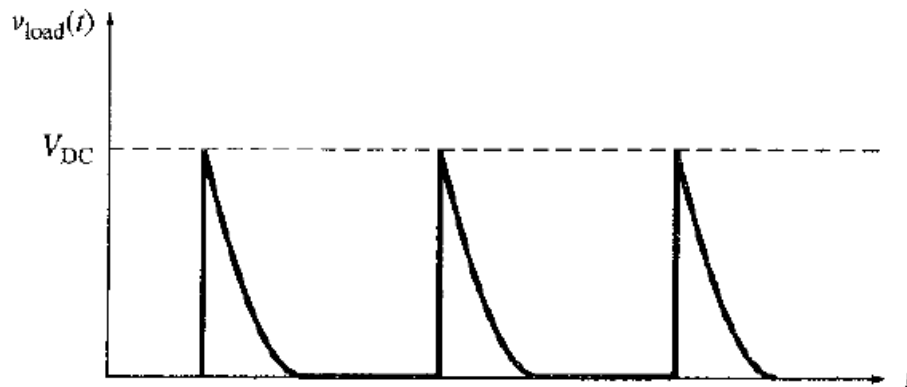
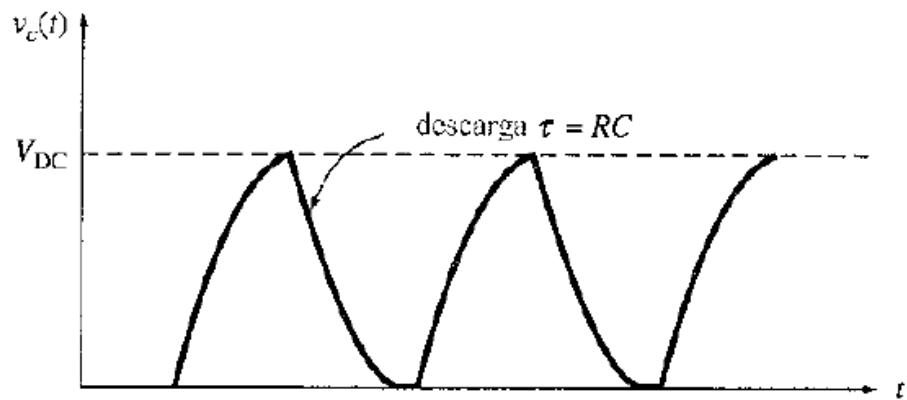


Fig.3.47 voltajes del condensador y la carga en el circuito recortador en serie.



Infortunadamente, este tipo de circuito está limitado en cuanto a su ciclo de trabajo puesto que el SCR no puede entenderse de nuevo hasta que el condensador se haya descargado. El tiempo de descarga depende de la Constante de tiempo $\tau = RC$ y C debe ser grande para mantener fluyendo una gran cantidad de corriente hacia la carga antes que se apague el SCR. Pero, R debe ser grande puesto que la corriente que fluye a través de la resistencia debe ser menor que la corriente de sostenimiento del SCR. Estos dos factores tomados en conjunto significan que SCR no puede ser encendido rápidamente después que se apague y necesita un tiempo de recuperación largo.

La figura 3.48 muestra un circuito de conmutación con condensador en serie mejorado, con un tiempo de recuperación acertado. Este circuito es similar al anterior excepto que la resistencia se ha remplazado por una inductancia y el SCR en serie. Cuando o el SCR se dispara, la corriente fluye hacia la carga y el condensador se cargará, apagando el SCR₁. Una vez apagado éste, puede ser encendido SCR₂, y Descargará el condensador más rapidez que la resistencia, La inductancia en serie con SCR₂, protegerá a este de interrupciones de corriente que puedan exceder su capacidad. Una vez que el condensador se descarga, SCR₂ se apaga y SCR₁ esta listo para encender de nuevo.

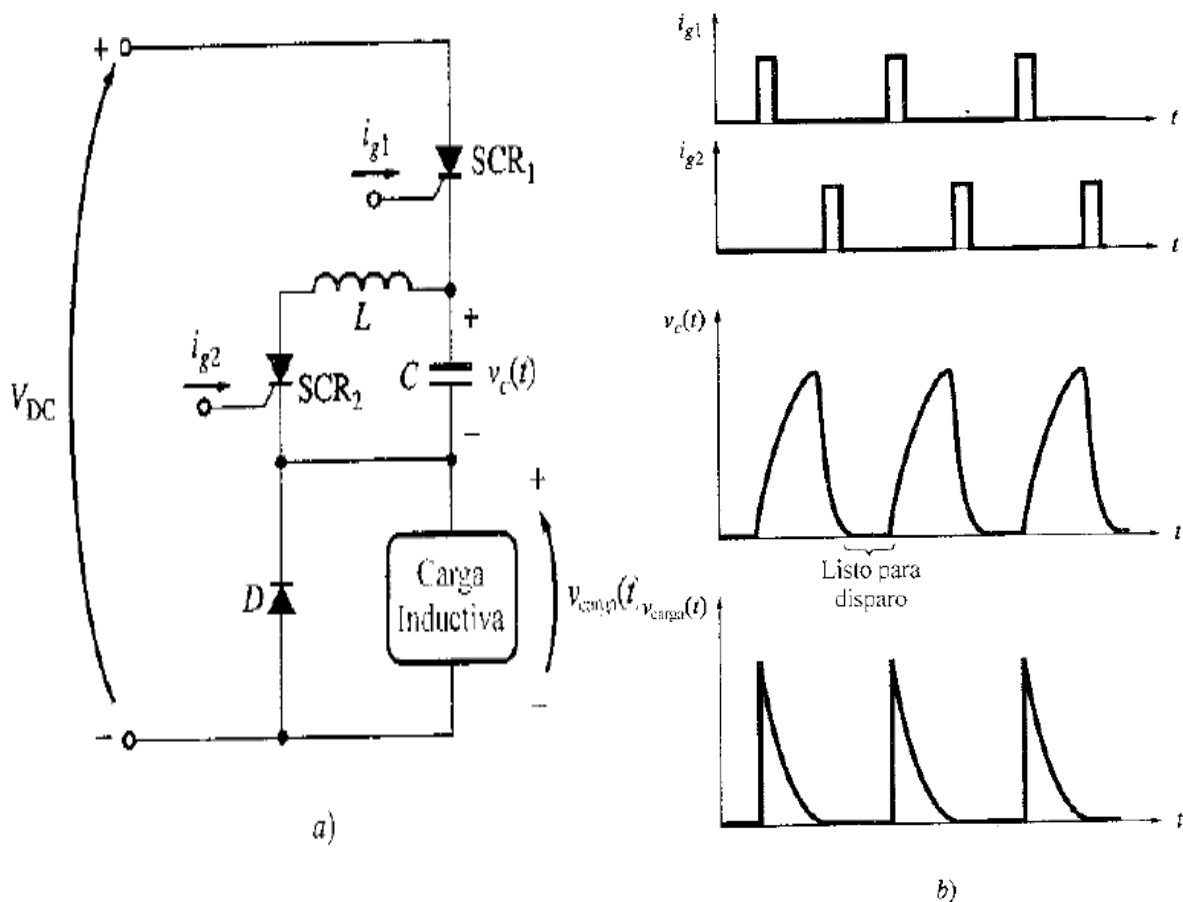


Fig.3.48 a) circuito recortador de conmutación forzada con condensación en serie y tiempo de recuperación mejorado. b) ondas de voltaje resultante en el condensador y la carga. Nótese que el condensador descarga mucho más rápidamente, de modo que el SCR₁ podría ser reencendido más pronto.



Circuitos de conmutación con condensador en paralelo

La otra manera común de llevar a cabo la conmutación forzada es por medio del esquema de condensador en paralelo. Un ejemplo sencillo del esquema de condensador en paralelo se muestra en la figura 3.49. En este esquema, SCR_1 es el SCR principal, que suministra potencia a la carga, y SCR_2 , controla la operación del condensador de conmutación. Para aplicar potencia a la carga, se enciende SCR_1 . Cuando esto ocurre, fluye una corriente a través de SCR hacia la carga suministrándole potencia. También el condensador C se carga a través de la resistencia R hasta alcanzar un voltaje igual al de la fuente V_{DC} .

Cuando se debe quitar la potencia a la carga, se enciende SCR_2 , y el voltaje a través de él cae a cero. Puesto que este voltaje del condensador no puede cambiar instantáneamente, el voltaje de la rama del lado izquierdo del condensador debe caer instantáneamente a $-V_{DC}$ volts. Esto apaga a SCR y el condensador se carga a través de la carga y SCR_2 hasta un voltaje V_{DC} volts positivo en su terminal del lado izquierdo. Una vez cargado el condensador C , SCR_2 se apaga y el ciclo, está listo para repetirse.

De nuevo, la resistencia R_1 , debe ser grande para que la corriente que circula a través de ella sea menor que la corriente de sostenimiento de SCR_2 . Pero una resistencia R_1 , grande significa que el condensador se cargará con lentitud, sólo después que SCR_1 , se encienda. Esto limita la rapidez de apagado de SCR_1 después de ser encendido, estableciendo un límite inferior al tiempo de la onda recortada.

La figura 3.49 muestra un circuito con un condensador cuyo tiempo de carga es reducido. En este circuito, SCR_3 , se dispara al mismo tiempo que SCR_1 y el condensador puede cargarse con mucha más rapidez. Esto permite que la corriente se apague más rápidamente si así se desea.

En cualquier circuito de esta clase, el diodo de marcha libre es importante en extremo. Cuando el SCR_1 , es forzado a apagarse, la corriente de la carga inductiva debe tener otra trayectoria disponible o podría dañar el SCR.

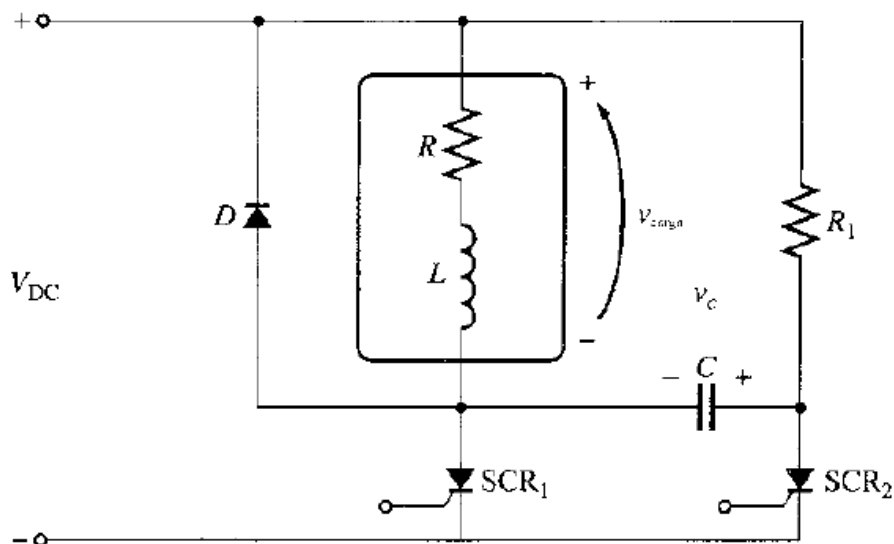


Figura 3.49 circuito recortador de conmutación forzada con condensador en paralelo.

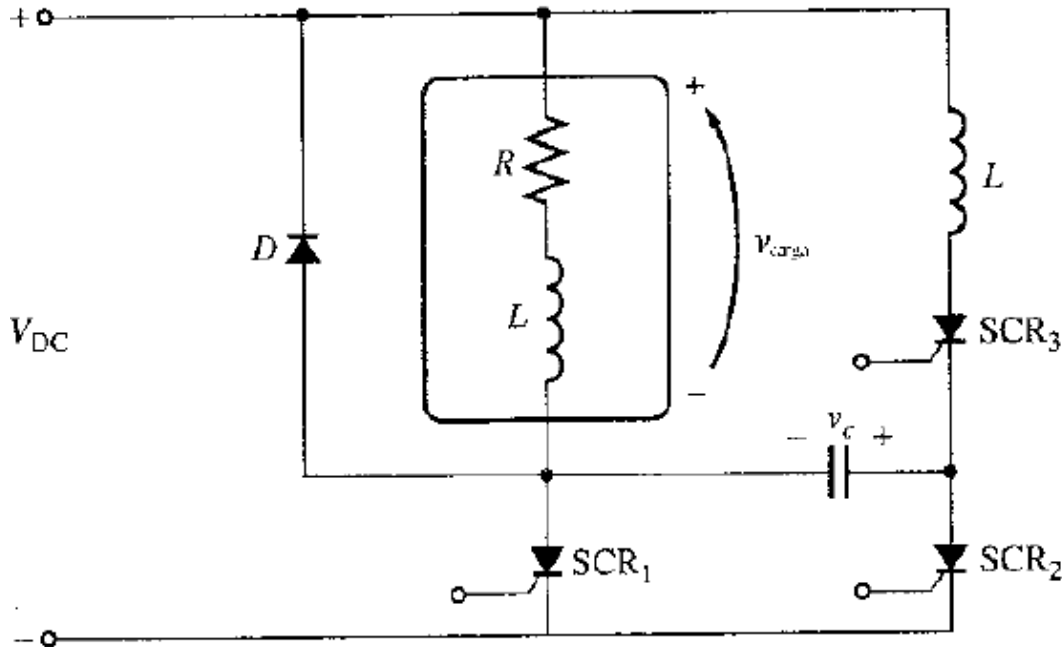


Figura 3.50 circuito recortador de conmutación forzada con tiempo mejorado de carga del condensador. SCR_2 , permite desconectar la potencia de la carga con más rapidez más rápidamente que con la lograda con el circuito básico de condensador en paralelo.

3.2.6 Inversores.

Quizás el área de más rápido crecimiento en la electrónica de potencia moderna es la conversión de frecuencia estática, conversión de una frecuencia de potencia alterna de una frecuencia a potencia alterna de otra frecuencia mediante electrónica de estado sólido. Tradicionalmente existen 2 aparatos para la conversión ac de frecuencia: el ciclo-convertidor y el rectificador-inversor. El ciclo convertidor es un dispositivo para convertir potencia alterna de una frecuencia, en potencia alterna de otra frecuencia, mientras que el rectificador-inversor convierte primero potencia alterna en potencia directa y luego potencia directa en potencia alterna a una diferente frecuencia.

Un rectificador-inversor se divide en dos partes:

1. Un rectificador para producir potencia dc.
2. Un inversor para producir potencia ac a partir de una potencia dc.

El rectificador

Los circuitos básicos de rectificación para convertir potencia ac en potencia dc. Estos circuitos tienen un problema desde el punto de vista del control de motores: su voltaje de salida es fijo para un voltaje de entrada dado. Este problema puede superarse reemplazando los diodos del circuito con SCR.

La figura 3.51 muestra un circuito rectificador de onda completa cuyos diodos han sido reemplazados con SCR. El voltaje de salida dc medio de este circuito depende del momento de disparo de los SCR durante sus semiciclos positivos. Si son disparador al comienzo del semiciclo, el circuito será igual al circuito rectificador trifásico de onda completa con diodos. Si nunca se



disparan los SCR, el voltaje de salida será 0 V. Para cualquier otro ángulo de disparo entre 0° y 180° de la onda, el voltaje de salida dc tendría algún valor comprendido entre el máximo y 0 V. Cuando se utilizan SCR en cambio de diodos para controlar el voltaje de salida dc en el circuito de rectificación, este voltaje de salida contendrá más armónicas que en un simple rectificador y, por ello, es importante implementar un filtro en la salida. La figura 3.51 muestra un filtro con inductancia y condensador, colocado en la salida del rectificador para suavizar la ondulación de la salida dc.

Inversores de conmutación externa

Los inversores se clasifican en dos tipos básicos de acuerdo con la técnica de conmutación utilizada: conmutación externa y autoconmutación. En los inversores de conmutación externa, la energía requerida para apagar los SCR es suministrada por un motor o una fuente de potencia externos. La figura 3.52 muestra un ejemplo de un inversor de conmutación externa. El inversor está conectado a un motor trifásico sincrónico que suministra la contra tensión necesaria para apagar un SCR cuando se enciende el complementario.

En el circuito, los SCR se disparan en el siguiente orden: $SCR_1, SCR_6, SCR_2, SCR_4, SCR_3, SCR_5$. Cuando el SCR_1 se enciende, el voltaje interno generado en el motor sincrónico provee el voltaje necesario para apagar a SCR_3 . Nótese que si la carga no estuviera conectada al inversor, los SCR nunca se apagarían y, después de medio ciclo, se originaría un cortocircuito a través de SCR_1 y SCR_4 . Este inversor también es llamado inversor conmutado por la carga.

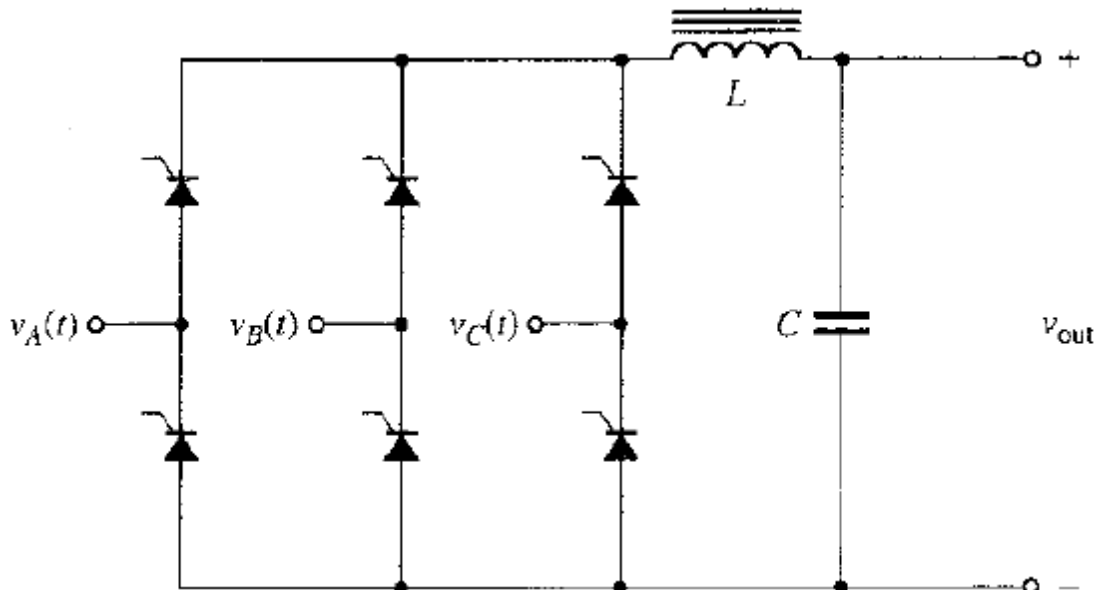


Fig.3.51 circuito rectificador trifásico que utiliza SCR para controlar el nivel de voltaje de salida dc.

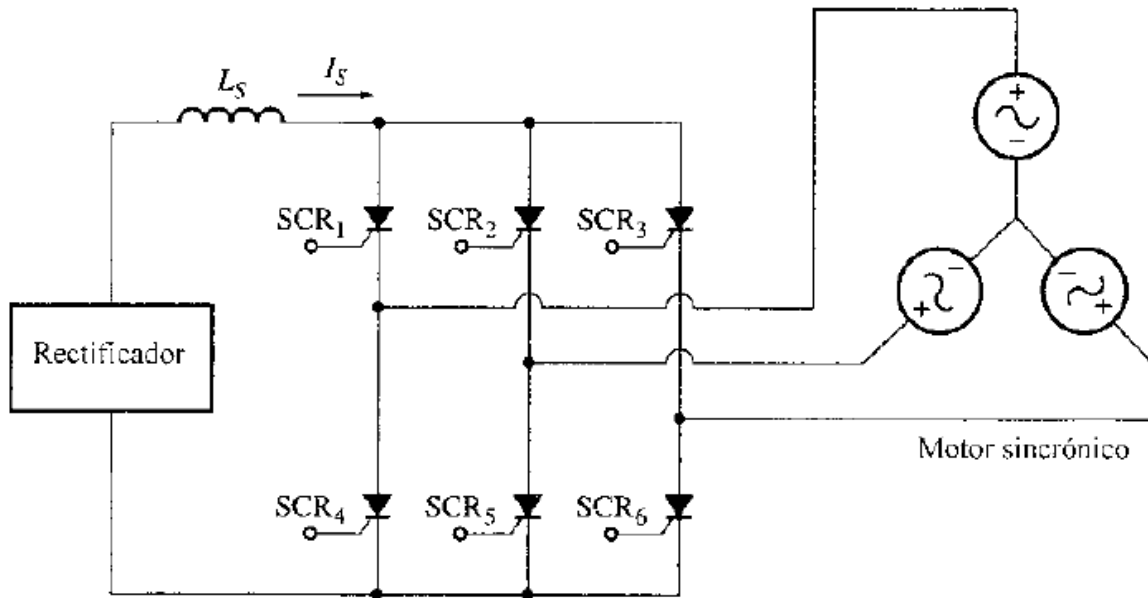


Fig.3.52 inversor de conmutación externa.

Inversores de autoconmutación.

Si no es posible garantizar que una carga provea siempre la contratensión adecuada para la conmutación, debe utilizarse un inversor de autoconmutación. Un inversor de autoconmutación es aquel en el cual los SCR activos se apagan mediante la acción de la energía almacenada en un condensador cuando se enciende otro SCR. También es posible diseñar inversores de autoconmutación utilizando GTO o transistores de potencia; en este caso, no se requieren condensadores para la conmutación.

Existen tres tipos principales de inversores de autoconmutación: inversores de fuente de corriente (CSI), inversores de fuente de voltaje (VSI) e inversores de modulación de ancho de pulso (PWM). Los inversores de fuente de corriente y de fuente de voltaje son más sencillos que los inversores PWM y han sido utilizados durante más tiempo. Los inversores PWM requieren circuitos de control muy complejos y componentes de conmutación más veloces que los CSI y los VSI. Estos dos últimos se estudian primero. Los inversores de fuente de corriente de fuente de voltaje son comparados en la figura 3.53.

En los inversores de fuente de corriente, se conecta un rectificador al inversor a través de una inductancia grande en serie, L_s . La inductancia de L_s es suficientemente grande para que la corriente directa sea obligada a permanecer casi constante. La onda de corriente de la salida del SCR será una onda cuadrada imperfecta puesto que el flujo de corriente es obligado a permanecer casi constante. El voltaje línea a línea será aproximadamente triangular. Es fácil limitar las condiciones de sobrecorriente en este diseño, pero el voltaje de salida puede fluctuar bastante en respuesta a cambios de la carga. En el inversor de fuente de voltaje, se conecta un rectificador al inversor a través de una inductancia L_s , y un condensador C en paralelo. La capacidad de C es suficientemente grande para que el voltaje sea obligado a mantenerse casi constante. La onda del voltaje línea a línea a la salida del SCR será una onda cuadrada imperfecta puesto que el



voltaje V_C es obligado a mantenerse casi constante. El flujo de corriente de salida sera casi triangular. Las variaciones de voltaje son pequeñas en este circuito, pero las corrientes pueden variar bruscamente con los cambios de la carga, y la protección de sobrecorriente es difícil de implementar. La frecuencia en ambos inversores, el de fuente de corriente y el de fuente de voltaje, puede cambiarse con facilidad variando los pulsos de encendido en las puertas de los SCR: por tanto, se pueden utilizar ambos inversores para controlar motores de corriente alterna a velocidades variables.

	Inversor de fuente de corriente	Inversor de fuente de voltaje
Configuración del circuito principal		
Tipo de fuente	Fuente de corriente $-I_S$ casi constante	Fuente de voltaje $-V_S$ casi constante
Impedancia de salida	Alta	Baja
Onda de salida		
Características	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fácil control de las condiciones de sobre corriente en este diseño. 2. El voltaje de salida varia ampliamente con los cambios de la carga. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dificultad para limitar la corriente debido al condensador. 2. Pequeñas variaciones del voltaje de salida, debido al condensador.

Fig.3.53 comparación de los inversores de fuente de corriente y los inversores de fuente de voltaje.

Inversor monofásico de fuente de corriente

Un circuito inductor monofásico de fuente de corriente con conmutación por condensador se muestra en la figura 3.54. Contiene dos SCR, un condensador y un transformador de salida. Para entender la operación de este circuito, se supone inicialmente que ambos SCR están apagados. Si el SCR_1 se enciende



por una corriente de puerta, el voltaje V_{DC} se aplicará a la mitad superior del transformador de la figura. Este voltaje inducirá un voltaje V_{DC} en la mitad inferior del transformador, causando la formación de un voltaje $2V_{DC}$ en el condensador. La figura 3.54b muestra los voltajes y las corrientes del circuito.

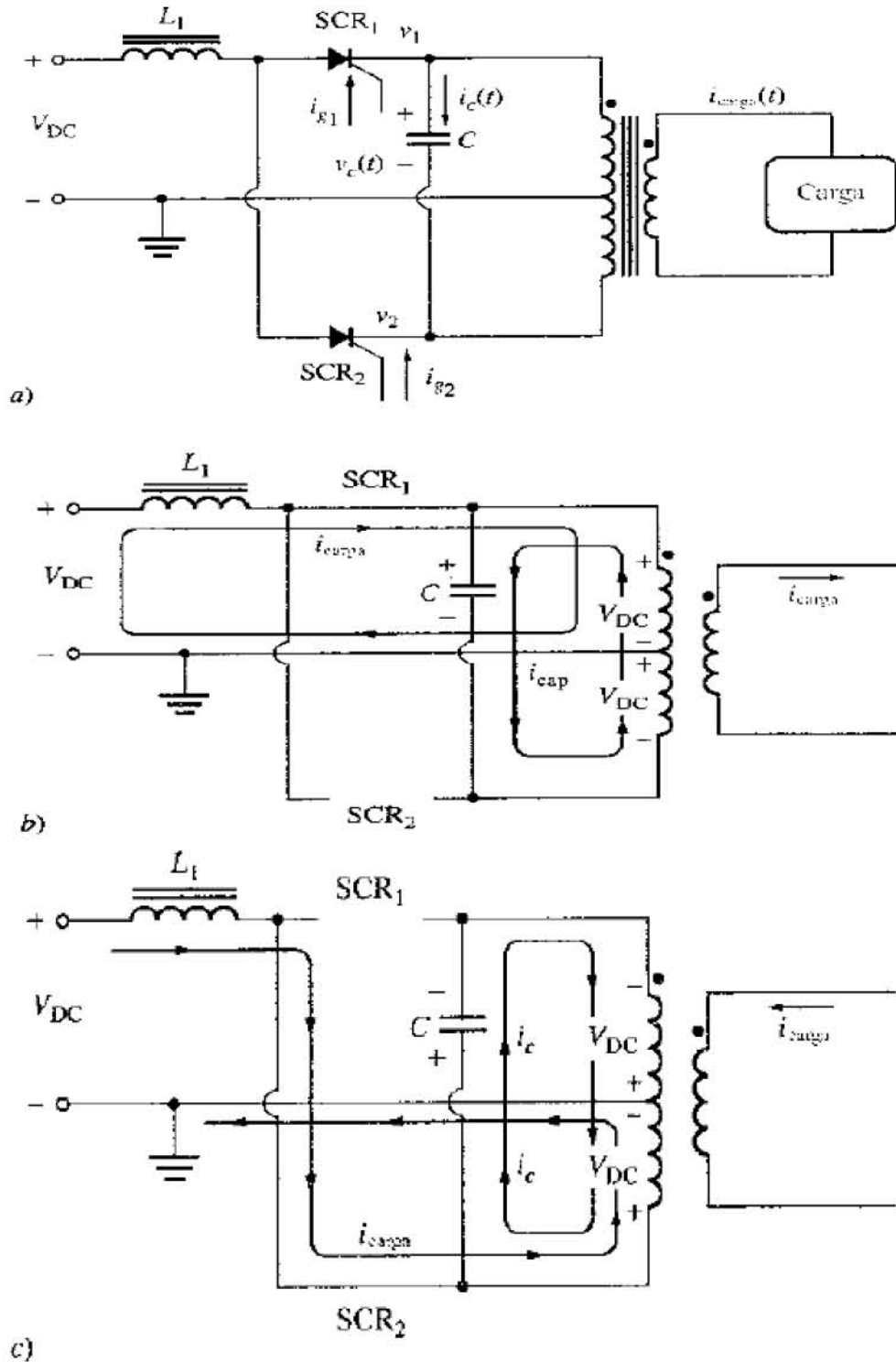


Fig.3.54 a) circuito monofásico inversor sencillo, b) voltajes y corrientes en el circuito cuando el SCR_1 es disparado, c) voltajes y corrientes en el circuito cuando el SCR_2 es disparado.



Ahora se enciende el SCR_2 . Cuando éste se enciende, el voltaje en el cátodo del SCR será V_{DC} . Puesto que el voltaje del condensador no puede cambiar instantáneamente, esto obliga a que el voltaje de la parte superior del condensador llegue a ser instantáneamente $3V_{DC}$, apagando a SCR_1 . En este momento, el voltaje de la mitad inferior del transformador será positivo en la parte inferior y negativo en la parte superior del devanado, su magnitud es V_{DC} . El voltaje de la mitad inferior induce un voltaje V_{DC} en la mitad superior del transformador, cargando el condensador C hasta un voltaje $2V_{DC}$ orientada positivamente en la parte inferior, con respecto a la parte superior del condensador. El estado del circuito en este momento se muestra en la figura 3.54c.

Cuando se enciende de nuevo el SCR_1 , el voltaje del condensador apaga a SCR_2 , y este proceso se repite de manera indefinida. La figura 3.55 muestra las ondas de voltaje y de corriente resultantes.

Inversor trifásico de fuente de corriente

La figura 3.54 muestra un inversor trifásico de fuente de corriente. En este circuito los seis SCR encienden en el orden $SCR_1, SCR_2, SCR_4, SCR_4, SCR_3, SCR_5$. Los condensadores C_1 a C_6 proveen la conmutación necesaria para los SCR.

Para entender la operación de este circuito, examine la figura 3.55. Si inicialmente SCR y SCR están conduciendo como muestra la figura 3.55a, se formará un voltaje en los condensadores C_1, C_3, C_4 y C_5 , como se ilustra en el diagrama. Suponga ahora que el SCR_6 es encendido. Cuando se enciende SCR_6 , el voltaje en el punto 6 cae a cero (véase la figura 3.52b) puesto que el voltaje del condensador C_5 no puede cambiar al instante, el ánodo del SCR_5 se polariza negativamente y el SCR_5 se apaga. Una vez que SCR_6 se ha encendido, todos los condensadores se cargan como se muestra en la figura 3.55c, y el circuito está listo para apagar a SCR_6 , cuando SCR_4 se encienda. Este mismo proceso de conmutación se aplica al banco superior de SCR. Las corrientes de salida, tanto de fase como de línea de este circuito, se ilustran en la figura 3.55d.

Inversor trifásico de fuente de voltaje

La figura 3.56 muestra un inversor trifásico de fuente de voltaje que utiliza transistores de potencia como elementos activos. Puesto que los transistores de potencia son autoconmutantes, no se incluyen en este circuito componentes especiales de conmutación.

En este circuito, los transistores conducen en el orden $T_1, T_6, T_2, T_4, T_3, T_5$. El voltaje de salida de fase y línea de este circuito se muestra en la figura 3.57b.

Inversores de modulación de ancho de pulso

La modulación de ancho de pulso es el proceso de modificar el ancho de los pulsos de un tren de pulsos en razón directa a una pequeña señal de control; cuanto mayor sea el voltaje de control, será más ancho el pulso resultante. Utilizando una senoide de una frecuencia deseada como voltaje de control en un circuito PWM, es posible producir una onda de alta potencia cuyo voltaje medio varía sinusoidalmente de manera adecuada para controlar motores de corriente alterna.

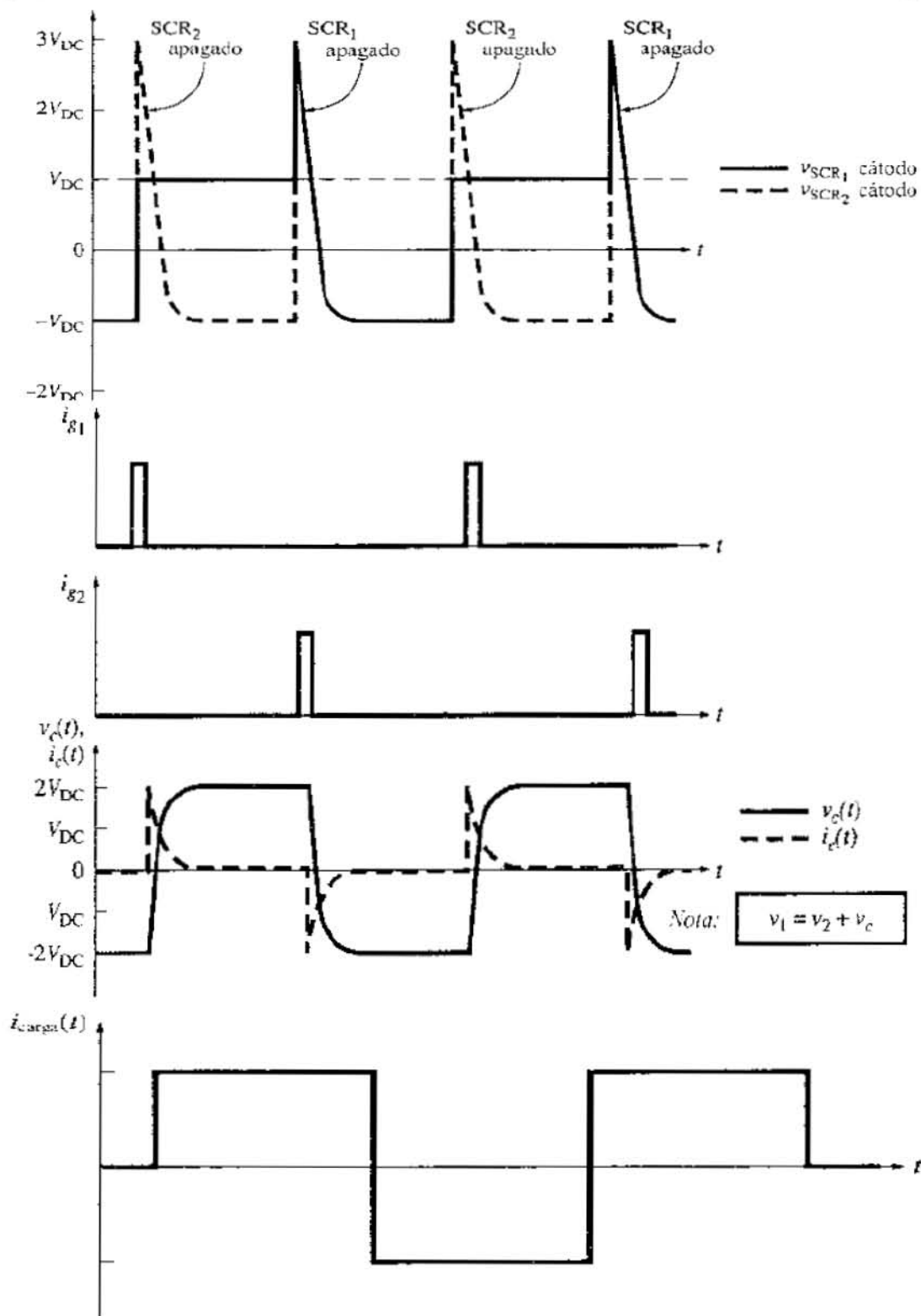


Fig.3.55 Graficas de los voltajes y las corrientes del circuito inversor: V_1 es el voltaje en el cátodo del SCR_1 y V_2 es el voltaje en el cátodo de SCR_2 . Puesto que el voltaje en los ánodos es V_{DC} , cada vez que V_1 o V_2 excedan a V_{DC} , SCR es apagado. i_{carga} Es la corriente suministrada a la carga del inversor.

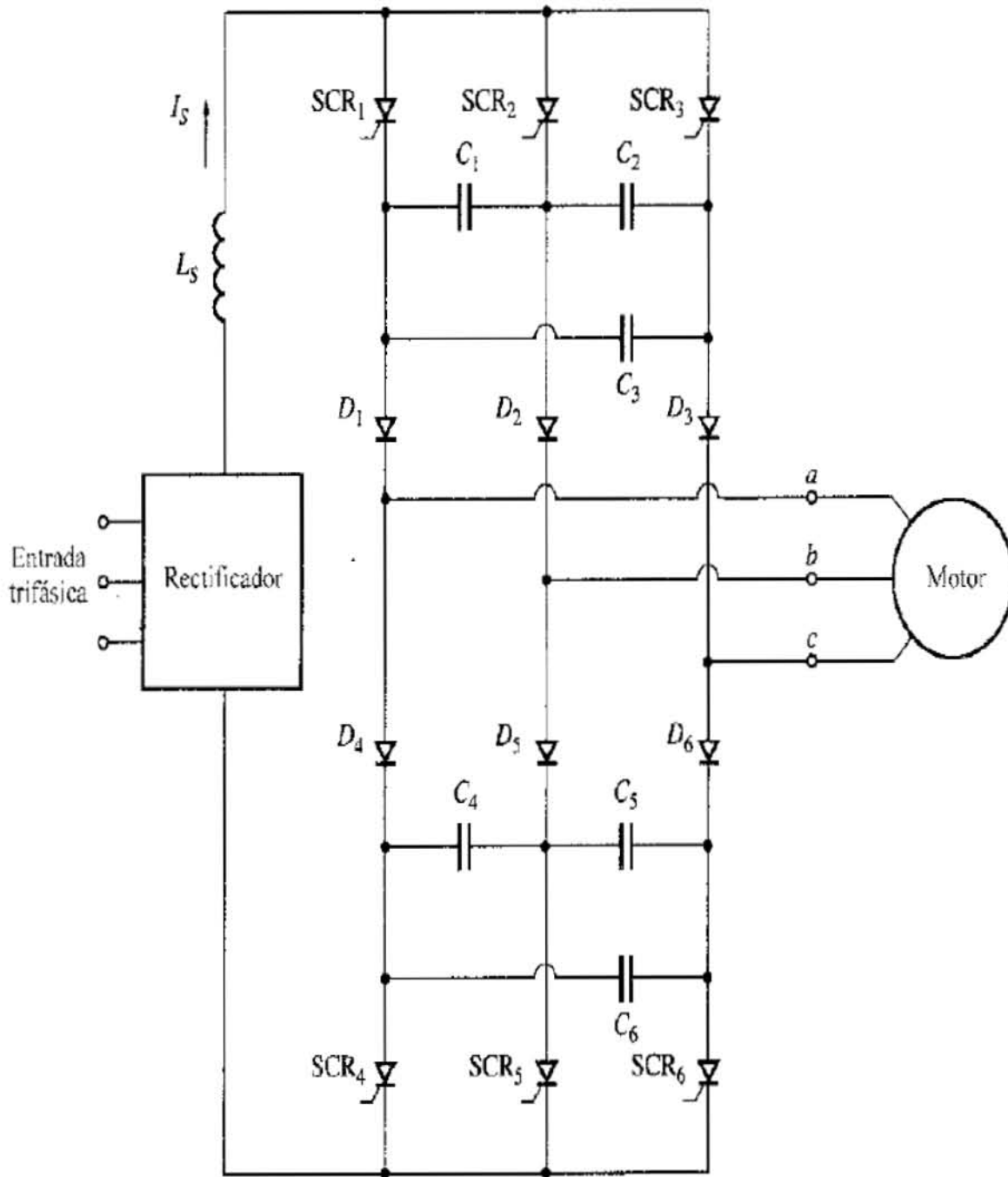


Fig.3.56 Inversor trifásico de fuente de corriente.



Los conceptos básicos de modulación de ancho de pulso se ilustran en la figura 3.58. La figura 3.58a muestra un circuito inversor PWM monofásico que utiliza IGBT. Los estados de $IGBT_1$ a $IGBT_4$ se controlan en este circuito por dos comparadores mostrados en la figura 3.58b.

Un comparador es un dispositivo que compara el voltaje de entrada $V_{in}(t)$ con una señal de referencia y enciende o apaga los transistores dependiendo del resultado de la prueba. El comparador A coteja $V_{in}(t)$ con el voltaje de referencia $V_x(t)$ y controla los IGBT, T_1 y T_2 . Basado en los resultados de la comparación. El comparador B coteja, $V_{in}(t)$ con el voltaje de referencia $V_y(t)$ y controla los IGBT, T_3 , y T_4 , con base en los resultados de la comparación. Si $V_{in}(t)$ es mayor que $V_x(t)$ en cualquier tiempo t , el comparador A encenderá a T_1 y apagará a T_2 , de otra forma. Encenderá a T_2 y apagará a T_1 . Asimismo si $V_y(t)$ es mayor que $V_{in}(t)$ en cualquier tiempo t , entonces el comparador B apagará a T_3 y encenderá a T_4 . De otro modo encenderá a T_3 y apagará a T_4 . Los voltajes de referencia $V_x(t)$ se muestran en la figura 3.59c.

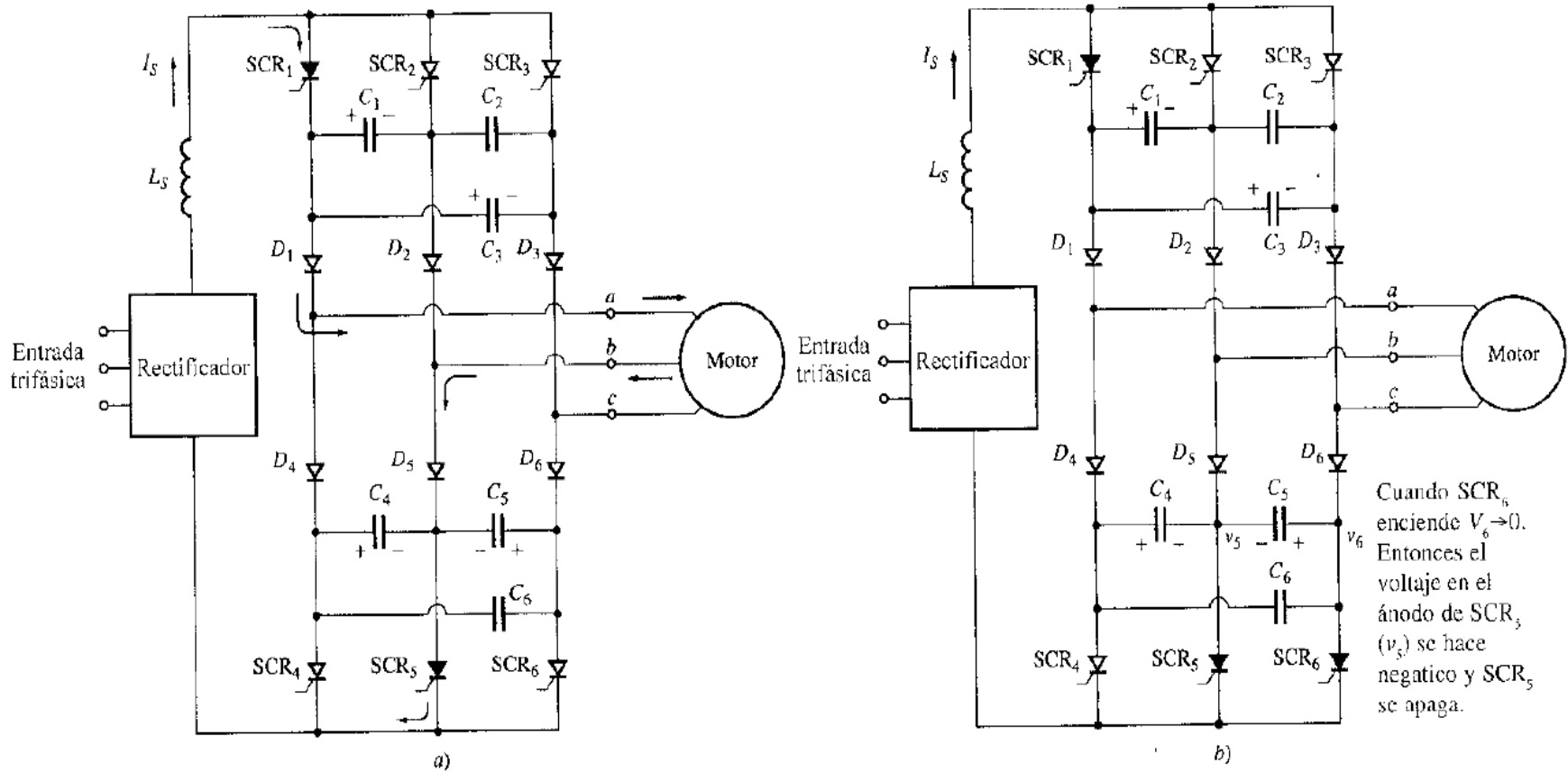


Fig.3.57

Operación del CSI trifásico. a) inicialmente conducen SCR_1 y SCR_5 nótese que los condensadores de conmutación se ha cargado. b) Situación cuando se enciende SCR_6 . El voltaje del ánodo del SCR_6 cae casi instantáneamente a cero. Puesto que el voltaje del condensador C_5 no puede cambiar al instante el voltaje en el ánodo de SCR_5 llega a ser negativo y SCR_5 se apagara.

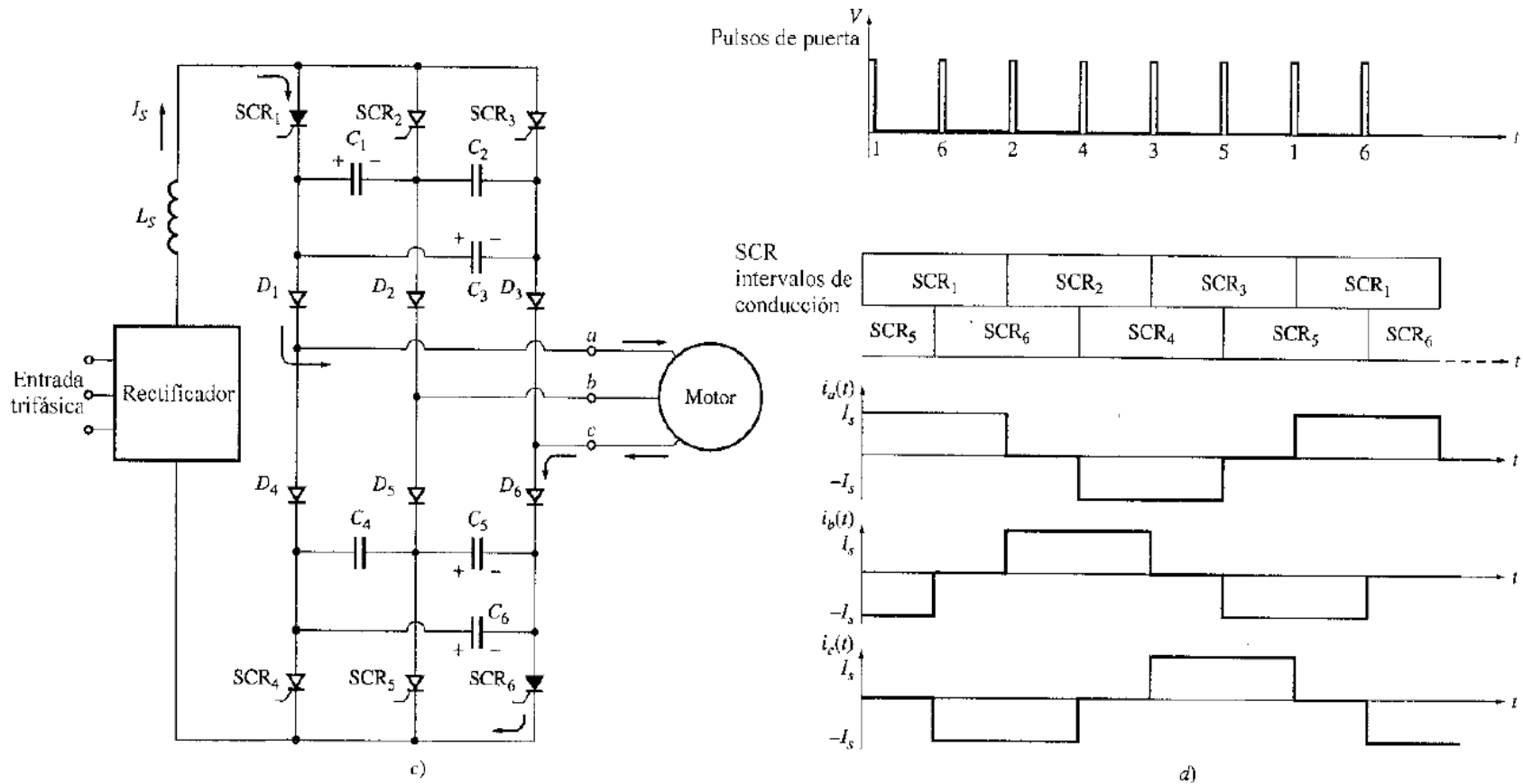


Fig.3.57(continuación)

C) ahora SCR₁ y SCR₆ conducen y los condensadores de conmutación se cargan como se muestra. d) pulsos de puerta, intervalos de conducción SCR y corriente de salida del inversor.



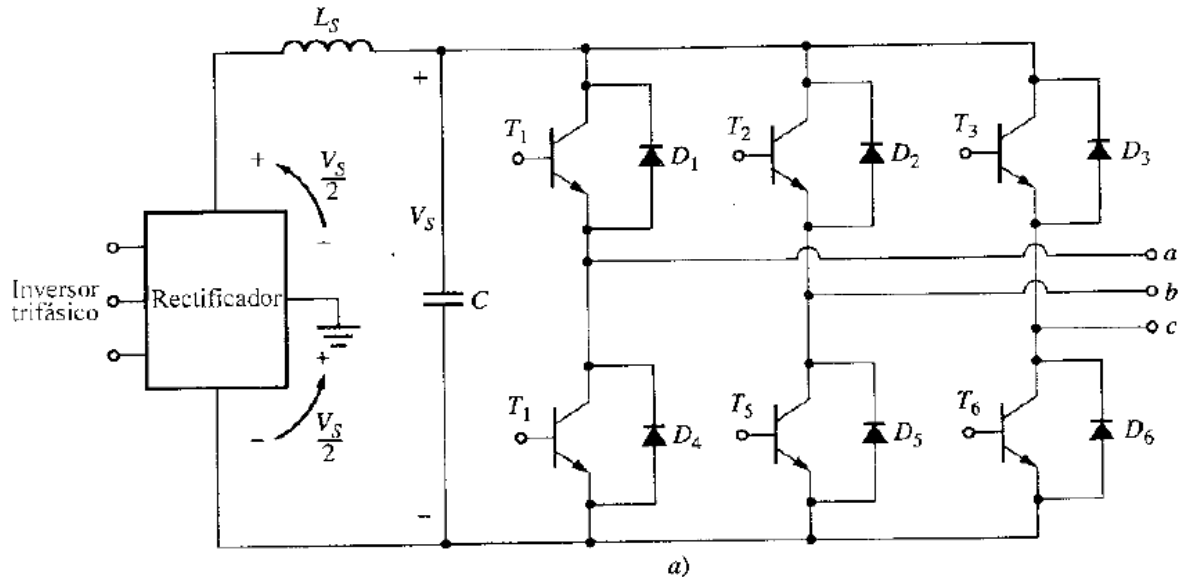


Fig.3.58 a) Inversor trifásico de fuente de voltaje que utiliza transistores de potencia.

Para entender la operación completa de este circuito inversor PWM, es preciso observar qué ocurre cuando se le aplican diferentes voltajes de control. Primero, se supone que el voltaje de control es 0 V. En este caso, los voltajes $V_u(t)$ y $V_v(t)$ son idénticos, y el voltaje de salida del circuito a la carga $V_{carga}(t)$ véase figura 3.60.

Luego, supone que se aplica al circuito un voltaje positivo de control, igual a la mitad del voltaje pico de referencia. El voltaje de salida resultante es un tren de pulsos con un ciclo de trabajo de 50%.

Por último, se supone que se aplica al circuito un voltaje sinusoidal de control, como se muestra en la figura 3.62. El ancho del tren de pulsos resultante varía sinusoidalmente con el voltaje de control. El resultado es una onda de alta potencia de salida cuyo voltaje medio sobre una pequeña región es directamente proporcional al voltaje medio de la señal de control en esa región. La frecuencia fundamentalmente de la onda de salida es igual a la del voltaje de la entrada de control. Aunque existen componentes de armónicas en la tensión de salida, usualmente no inciden en las aplicaciones de control de motores. Las armónicas componentes pueden causar calentamiento adicional en el motor que se controla con un inversor, pero el calentamiento extra puede ser compensado mediante la utilización de un motor de diseño especial u operando el motor común a una potencia inferior a su potencia nominal.

Un inversor PWM trifásico completo puede constar de tres inversores monofásicos como los descritos, con voltajes de control compuestos de sinusoides desfasados 120° entre fases. El control de frecuencia en un inversor PWM de este tipo se complementa cambiando la frecuencia del voltaje de entrada de control.

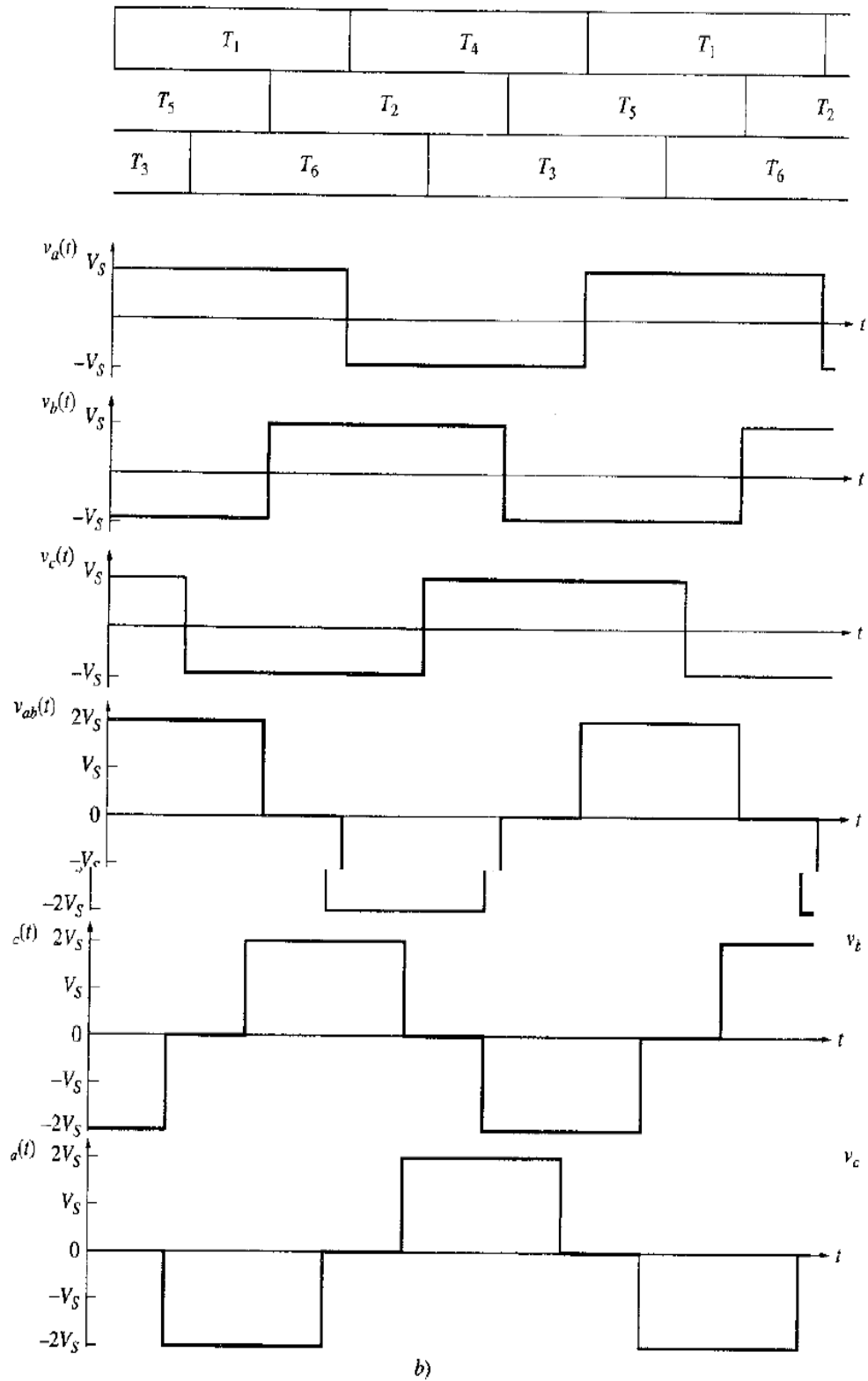


Fig. 3.58 (continuación)
b) Voltajes de salida del inversor, de fase y de línea.

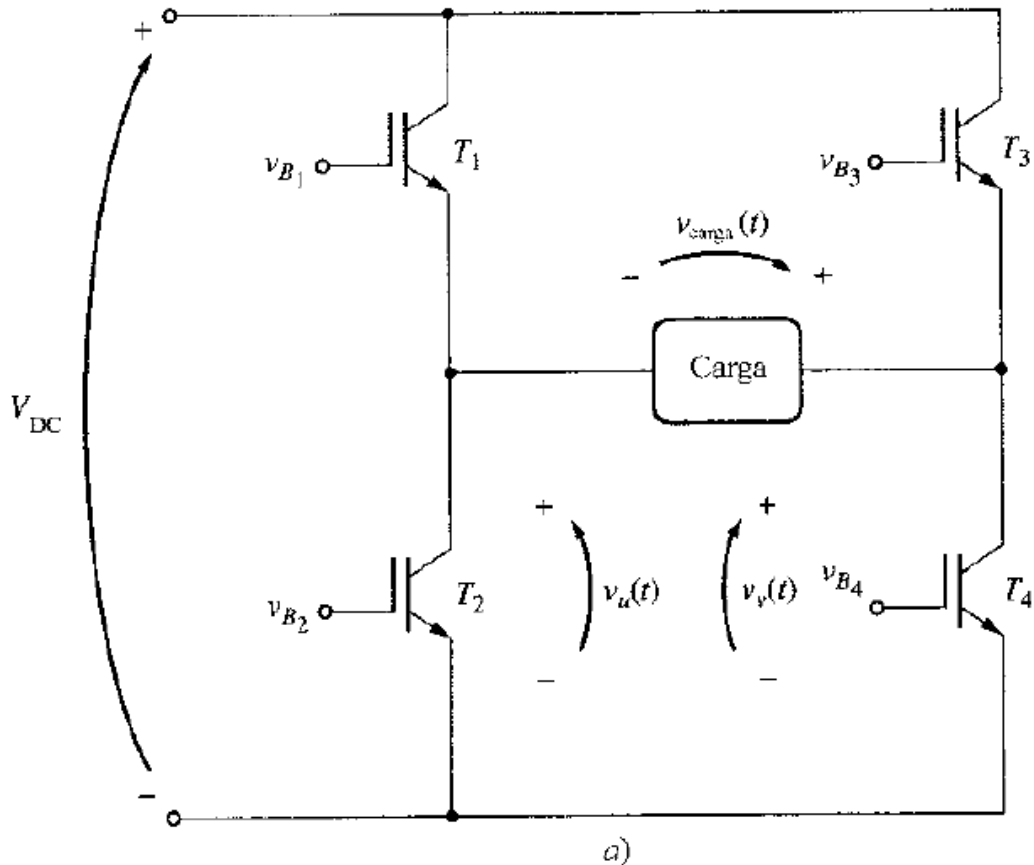


Fig.3.59 Conceptos básicos de modulación de ancho de pulso. a) circuito PWM monofásico con IGBT.

Un inversor PWM conmuta estados muchas veces durante un solo ciclo del voltaje de salida resultante. En la actualidad se utilizan voltajes de referencia con frecuencias tan grandes como 12 kHz en los diseños de los inversores PWM. De este modo, las componentes del inversor PWM deben cambiar de estado 24,000 veces por segundo. Esta conmutación rápida significa que los inversores PWM requieren componentes más rápidos que los CSI o los VSI. Para operar de manera adecuada, los inversores PWM necesitan componentes de alta potencia y alta frecuencia como los tiristores GTO, los IGBT o los transistores de potencia (en los actuales momentos, los IGBT tienen la ventaja por su alta velocidad y alta conmutación de potencia; por estas razones, son las componentes preferidas para la construcción de los inversores PWM). El voltaje de control suministrado a los circuitos comparadores usualmente se implementa en forma digital por medio de un microcomputador montado en una placa de circuito dentro del controlador PWM del motor. El voltaje de control (y por tanto el ancho del pulso de salida) puede ser controlado por el microcomputador de manera mucho más sofisticada que la describir aquí. El microcomputador puede variar el voltaje de control para obtener las diferentes frecuencias y los niveles de voltaje deseados. Por ejemplo, el microcomputador podría implementar varias rampas de aceleración y de desaceleración, límites de corriente, y curvas de voltaje-frecuencia, cambiando simplemente de opción en el software.

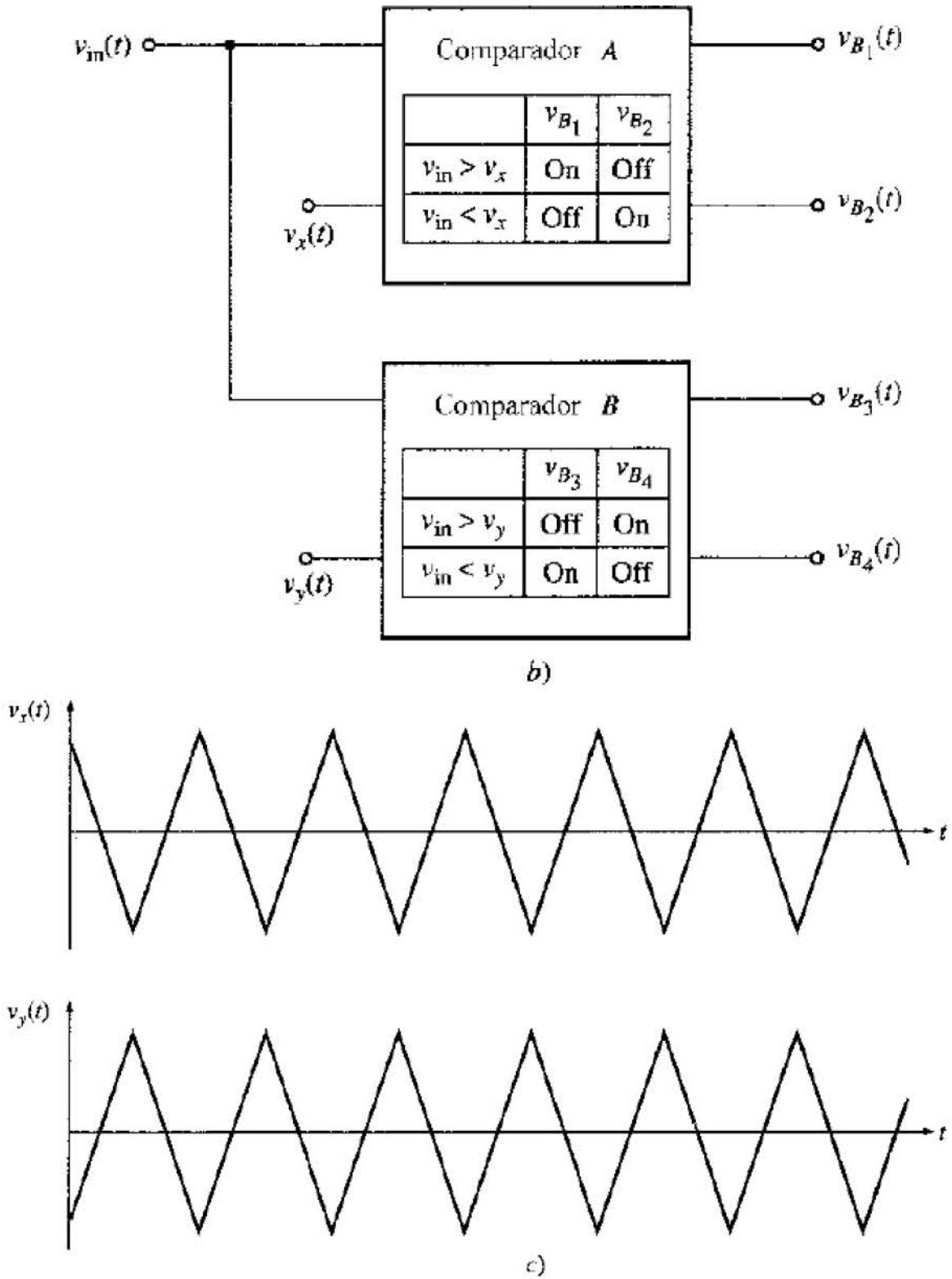


Fig.3.59 (continuación)

b) Comparadores utilizados para controlar el estado de encendido o apagado de los transistores.

c) Voltajes de referencia utilizados en los comparadores.



3.2.7 Cicloconvertidores.

El cicloconvertidor es un dispositivo para conversión directa de potencia alterna a una frecuencia en potencia alterna a otra frecuencia. Comparado con los esquemas del rectificador-inversor, los cicloconvertidores tienen muchos más SCR y circuitos de puerta mucho más complejos. A pesar de estas desventajas, los cicloconvertidores pueden ser menos costosos que los rectificadores inversores en altas potencias nominales.

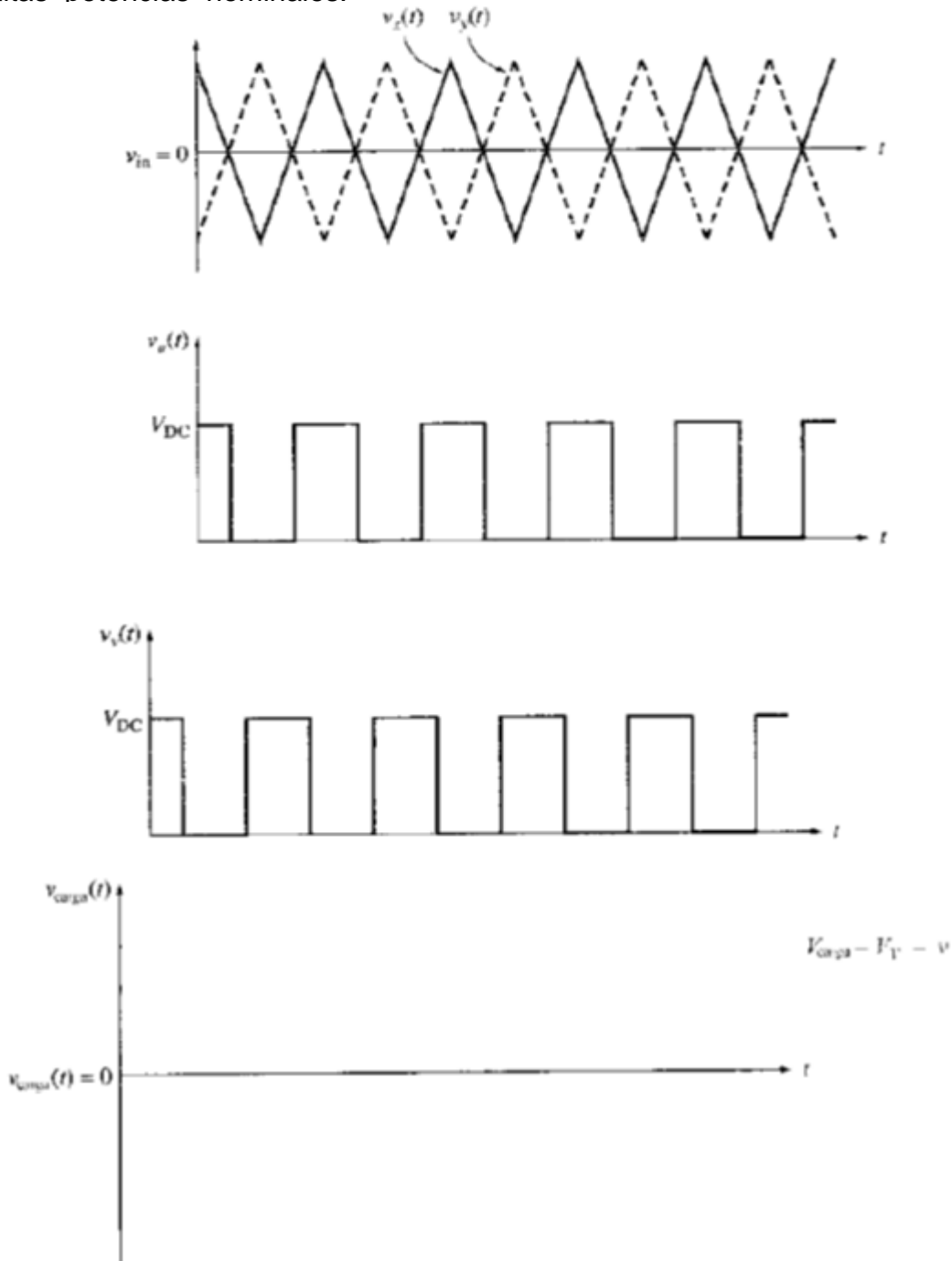


Fig.3.60 salida de un circuito PWM con voltaje de entrada de 0 V. Nótese que $V_u(t) = V_v(t)$, por lo cual $V_{carga}(t) = 0$.



En la actualidad, los cicloconvertidores están disponibles en versión de frecuencia constante o de frecuencia variable. Un cicloconvertidor de frecuencia constante se utiliza para suministrar potencia de una frecuencia desde una fuente a otra frecuencia (por ejemplo, para alimentar cargas de 50 Hz desde una fuente de 60 Hz). Los cicloconvertidores de frecuencia variable se utilizan para suministrar una salida variable de voltaje y frecuencia desde una fuente de voltaje constante y frecuencia constante. Con frecuencia se utilizan como controladores de motores de inducción ac.

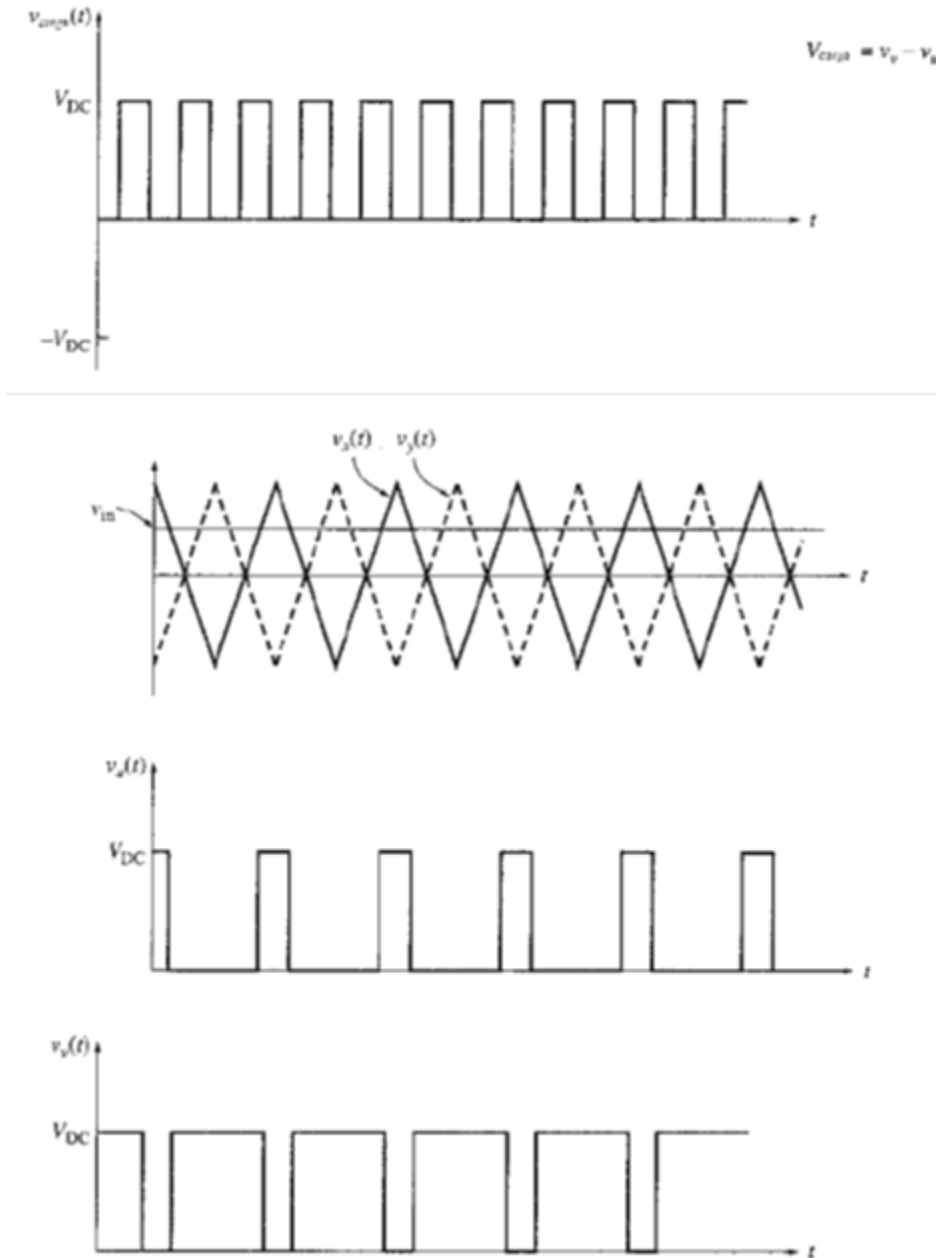


Fig.3.61 salida de un circuito PWM con voltaje de entrada igual a la mitad del voltaje pico del comparador.



Aunque los detalles de un cicloconvertidor pueden ser muy complejos, la filosofía del aparato es sencilla. La entrada a un cicloconvertidor es una fuente trifásica que consta de tres voltajes de igual magnitud, desfasados 120° entre sí. El voltaje de salida deseado es una onda especificada, usualmente una senoide de frecuencia diferente. El cicloconvertidor genera su onda de salida deseada, seleccionando la combinación de las tres fases de entrada que más se aproxima al voltaje de salida deseado en cada instante.

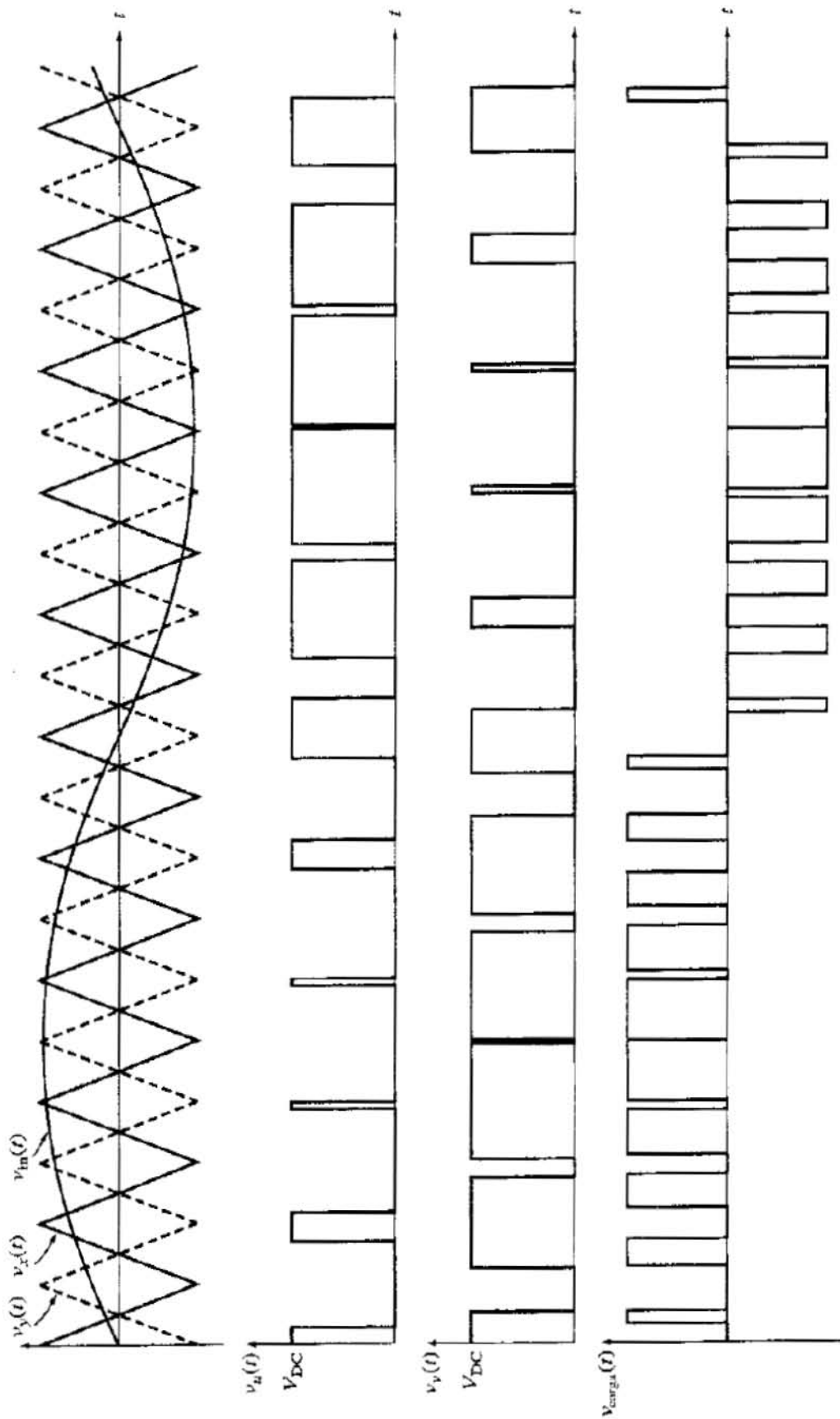


Fig. 3.62 salida de un circuito PWM con voltaje sinusoidal de control aplicado a su entrada

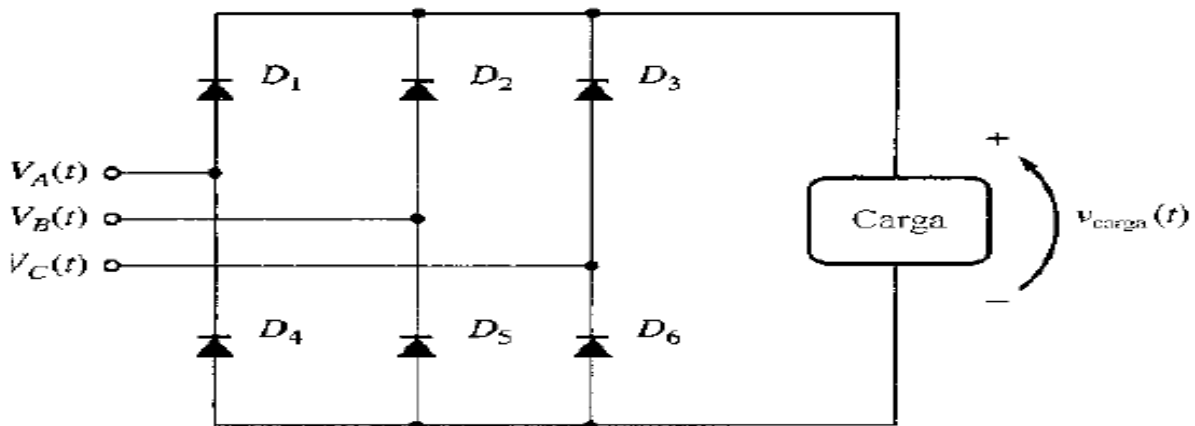


Existen dos categorías principales de cicloconvertidores: cicloconvertidores de corriente no circulante y cicloconvertidores de corriente circulante. Estos dos tipos se distinguen por que la corriente circula o no en el cicloconvertidor; además, tienen diferentes características. Los dos tipos de cicloconvertidores se describen más adelante, después de la introducción a los conceptos básicos de los cicloconvertidores.

Conceptos básicos

Una buena forma de comenzar el estudio de los cicloconvertidores es analizar en detalle el circuito puente rectificador trifásico de onda completa. Este circuito se muestra en la Figura 3.63 conectado a una carga resistiva. En esa figura, los diodos se dividen en dos mitades, una positiva y la otra negativa. En la mitad positiva, conducirá el diodo con el voltaje más alto aplicado a él en determinado momento y polarizará inversamente los otros dos diodos de esa mitad. En la mitad negativa, conducirá el diodo que tenga el más bajo voltaje aplicado a él en algún instante. Y polarizará inversamente a los otros dos diodos de esa sección. La figura 3.64 muestra el voltaje de salida resultante.

Si los seis diodos del circuito puente se reemplazan por seis SCR, como se muestra en la figura 3.65, y el SCR, está conduciendo inicialmente como muestra en la figura 3.65b, este SCR continuará conduciendo hasta que la corriente que circula a través de él caiga por debajo de I_H . Si ningún otro SCR de la mitad positiva se dispara, el SCR_1 se apagará cuando el voltaje V_A llegue a cero e invierte su polaridad en el punto 2. Sin embargo, si el SCR_2 , se dispara en cualquier momento después del punto 1, el SCR_1 , quedará polarizado inversamente al instante y se apagará. El proceso en que el SCR_2 , obliga al apagado de SCR_1 , se llama conmutación forzada. Ésta es posible sólo



$$V_A(t) = V_M \text{sen} \omega t \text{ V}$$

$$V_B(t) = V_M \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \text{ V}$$

$$V_C(t) = V_M \text{sen}(\omega t - 240^\circ) \text{ V}$$

Fig. 3.63 Puente de diodos rectificador de onda completa conectado a una carga resistiva.

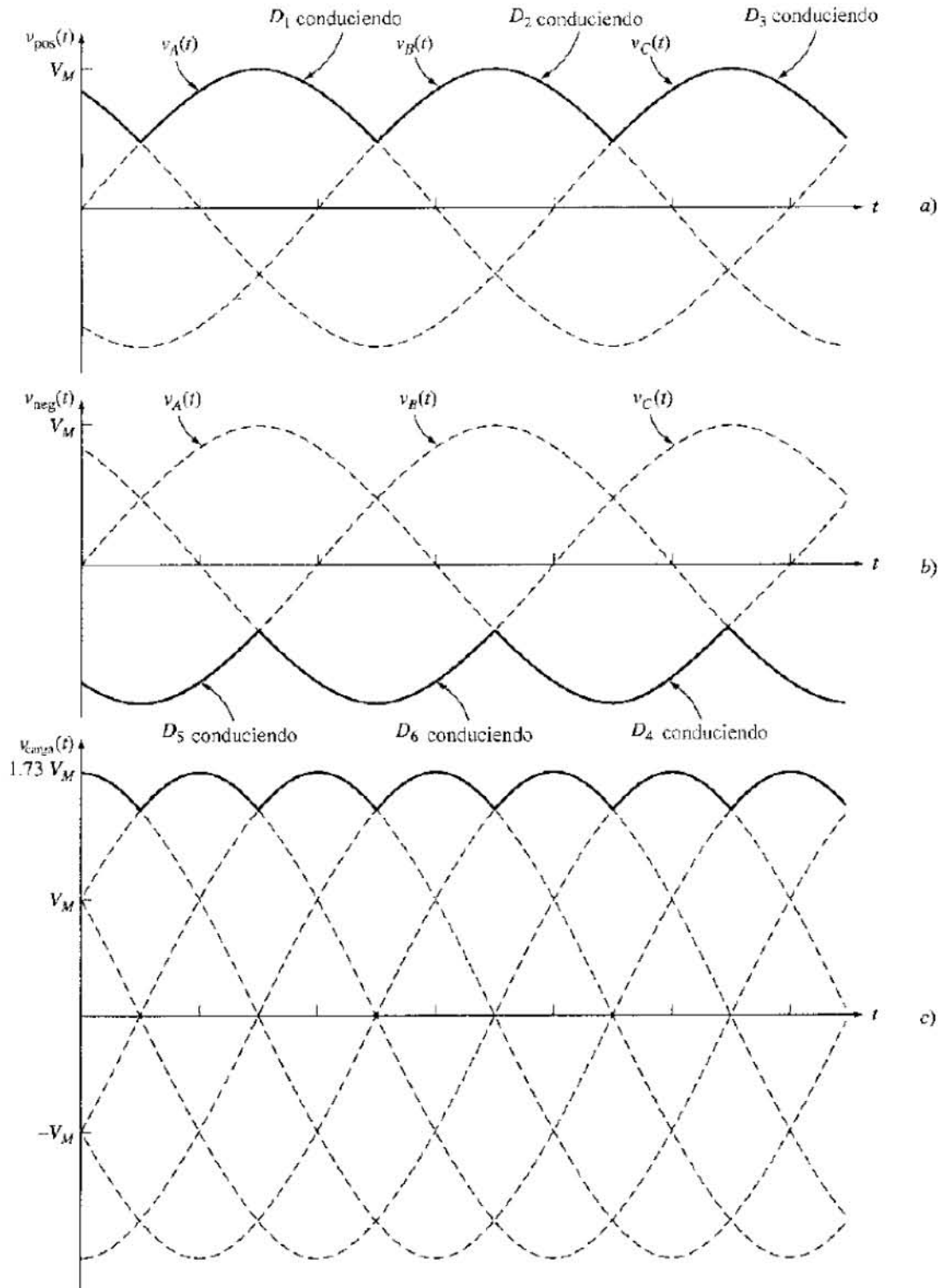


Fig.3.64 a) salida de voltaje de los diodos de la sección positiva, b) salida del voltaje de la sección negativa, c) voltaje aplicado a la carga.



Para ángulos de fase comprendidos entre los puntos 1 y 2. Los SCR de la mitad negativa se comportan de manera similar. Como se muestra en la figura 3.65c. Nótese que si cada uno de los SCR se dispara tan pronto como la conmutación es posible, la salida de este circuito puente será igual a la del puente de diodos rectificador de onda completa mostrado en la figura 3.63.

Ahora, si se desea producir en este circuito una salida de voltaje linealmente decreciente. Como se muestra con la figura 3.66, debe apagarse el SCR que conduce en la mitad positiva del circuito puente cada vez que su voltaje cae demasiado por debajo del valor deseado. Esto se logra disparando otro SCR a un voltaje superior al valor deseado. De la misma forma, el SCR que conduce en la mitad negativa del circuito puente debe apagarse cada vez que su voltaje sobrepase demasiado el valor deseado. Disparando los SCR en las mitades positiva y negativa en el momento adecuado, es posible producir un voltaje de salida que decrece aproximadamente, en correspondencia con la onda deseada. Examinando la figura 3.66, es obvio que muchas armónicas componentes están presentes en el voltaje de salida resultante.

Si se conectan en paralelo dos de estos circuitos puente SCR, con polaridades opuestas. El resultado es un cicloconvertidor de corriente no circulante.

Cicloconvertidores de corriente no circulante

La figura 3.66 muestra una fase de un cicloconvertidor típico de corriente no circulante. Un cicloconvertidor trifásico completo está conformado de tres unidades idénticas de este tipo. Cada unidad consta de dos circuitos puente rectificador SCR de onda completa, trifásicos: uno que conduce corriente en la dirección positiva (El grupo positivo) y uno que conduce corriente en la dirección negativa (el grupo negativo). Los SCR del circuito son disparados en tal forma que se aproximen a un voltaje de salida sinusoidal. Los SCR del grupo positivo se disparan cuando el flujo de corriente está en la dirección Positiva; los SCR del grupo negativo se disparan cuando el flujo de corriente está en la dirección negativa. El voltaje de salida resultante se muestra en la figura 3.67.

Como puede verse en la figura 3.67, los cicloconvertidores de corriente no circulante producen un voltaje de salida con un componente de armónicas alto. Estas armónicas altas limitan la frecuencia de salida del cicloconvertidor a un valor más o menos inferior a un tercio de la frecuencia de entrada.

Además. Nótese que el flujo de corriente debe conmutarse del grupo positivo al grupo negativo, o viceversa, en el momento en que la corriente de carga cambia de dirección. Los circuitos de pulsos de control del cicloconvertidor deben detectar esta transición de corriente con un detector de polaridad de corriente continua desde el encendido de un grupo de SCR hasta el encendido del otro grupo. En general hay un breve periodo durante la transición en el cual no conduce ni el grupo positivo ni el grupo negativo. Esta pausa de corriente causa desviaciones adicionales en la onda de salida.

El alto contenido de armónicas, la baja frecuencia y las desviaciones de corriente asociadas a los cicloconvertidores de corriente no circulante se unen para limitar su utilización. En un cicloconvertidor práctico de corriente no circulante, se dispone un filtro (usualmente un inductor en serie o un transformador) entre la



salida del cicloconvertidor y la carga para suprimir algunas de las armónicas de salida.

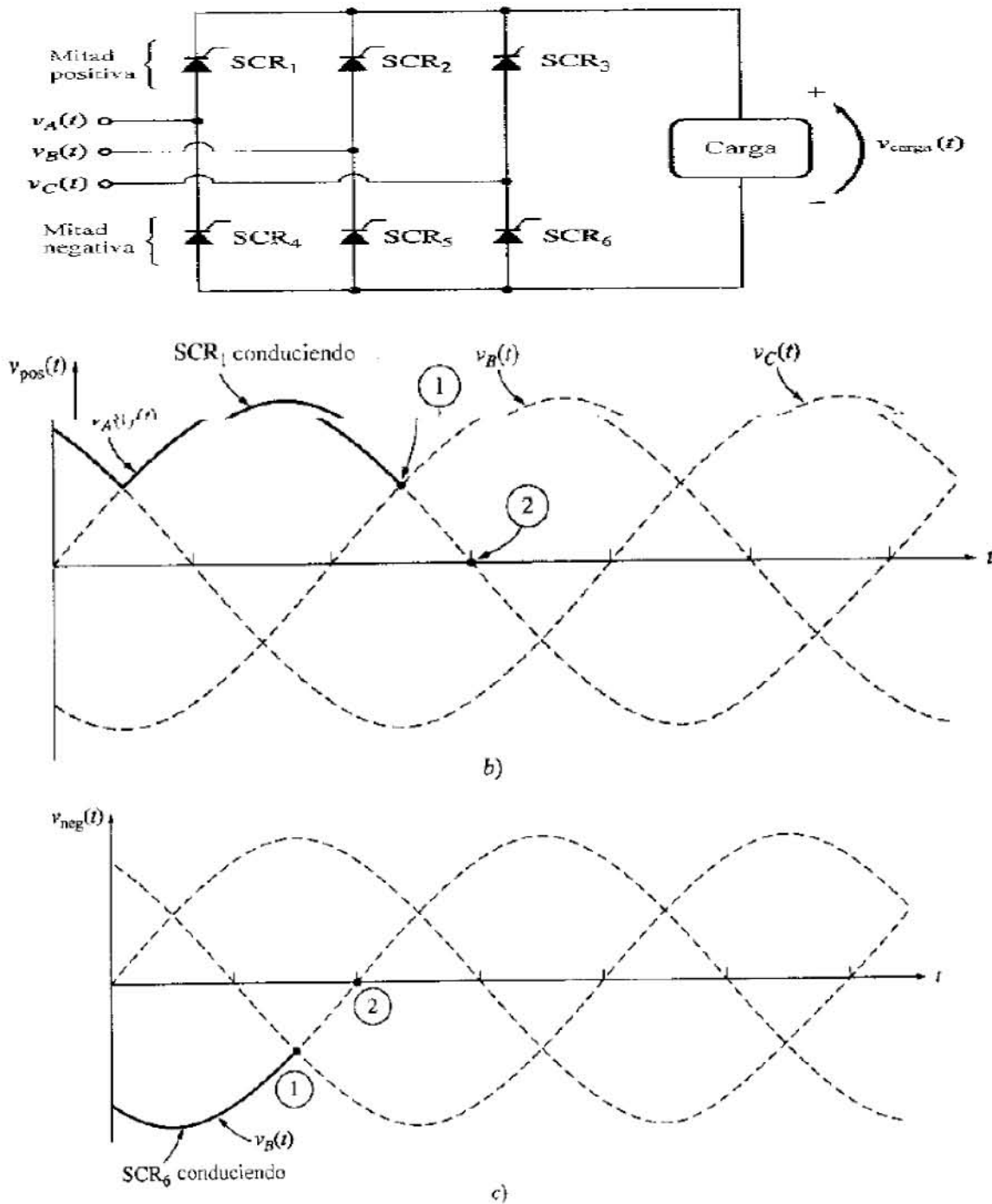


Figura 3.65 a) circuito puente rectificador de onda completa trifásico, conectado a una carga resistiva, b) operación de la sección positiva de los SCR, se supone que inicialmente está conduciendo SCR₁. Si se dispara SCR₂ en cualquier momento después del punto 1, SCR₁ será polarizado inversamente y se apagará. c) operación negativa de los SCR. Se supone que inicialmente SCR₆ está conduciendo. Si SCR₄ es disparado en cualquier momento después del punto 1, SCR₆ será polarizado inversamente y se apagará.

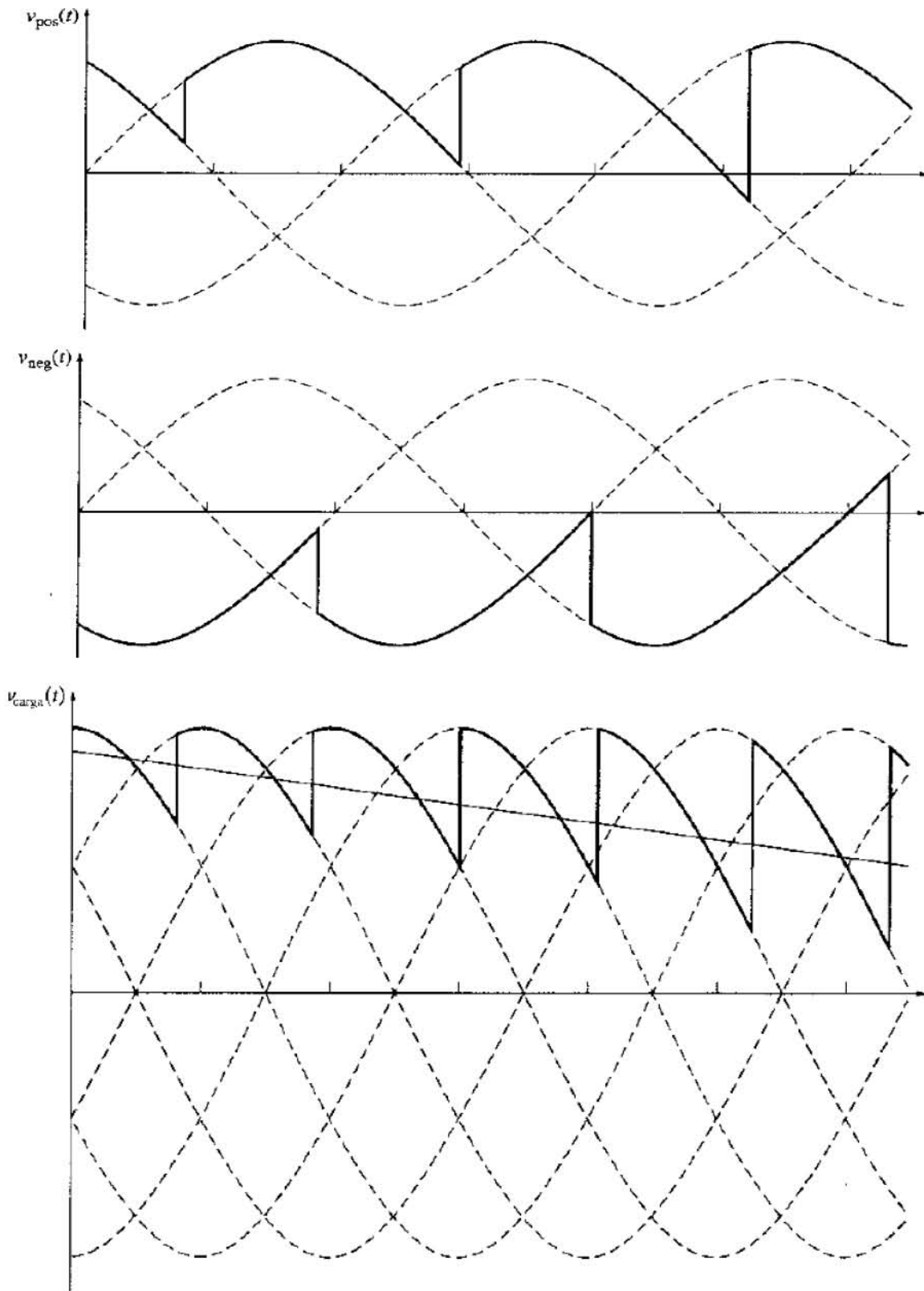


Fig.3.66 Aproximación a un circuito lineal decreciente con un circuito puente rectificador trifásico de onda completa SCR.

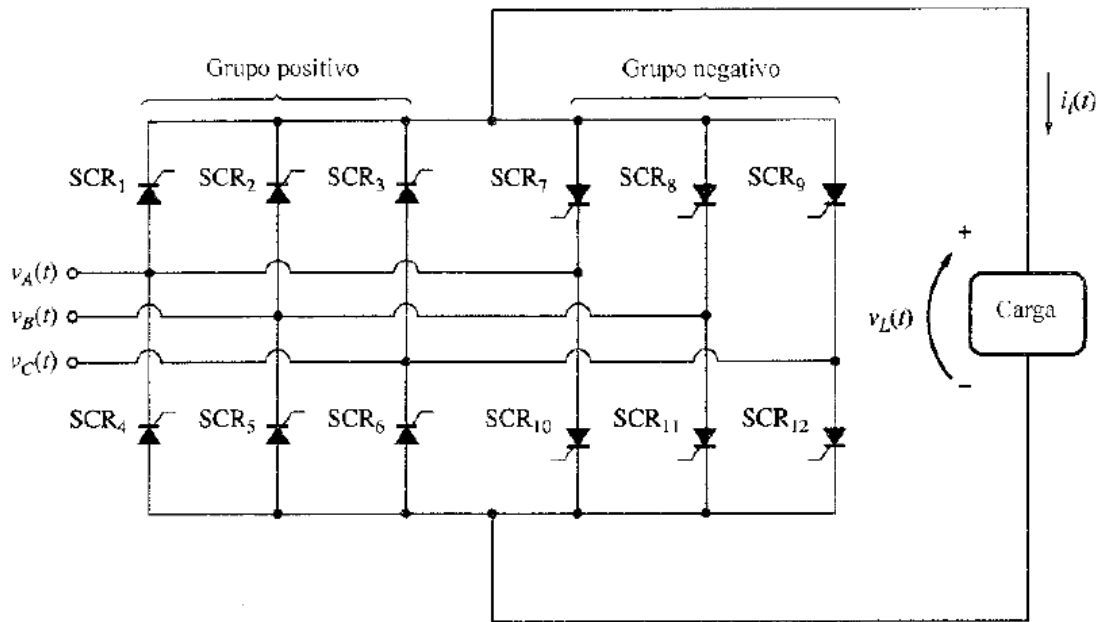


Fig.3.67 Fase de un circuito cicloconvertidor de corriente no circulante.

Cicloconvertidores de corriente circulante

La figura 3.69 muestra una fase de un cicloconvertidor de corriente circulante típico que difiere del cicloconvertidor de corriente no circulante en que los grupos Positivo y negativo se conectan a través de dos inductancias grandes y la carga se alimenta desde las tomas centrales de las inductancias. A diferencia de los cicloconvertidores de corriente no circulante, ambos grupos el positivo y el negativo están conduciendo al mismo tiempo y, a través del lazo formado por los dos grupos y los inductores en serie fluye una corriente de circulación. Los inductores en serie deben ser suficientemente grandes en un circuito de este tipo para limitar la corriente circulante a un valor seguro.

El voltaje de salida del cicloconvertidor de corriente circulante tiene menor contenido de amónicas que el voltaje de salida del cicloconvertidor de corriente no circulante, y su máxima frecuencia puede ser mucho mayor. Como tiene un bajo factor de potencia debido a las dos grandes inductancias en serie. Con frecuencia se utilizan condensadores para compensarlo. La razón de que el cicloconvertidor de corriente circulante tenga bajo contenido de armónicas se ilustra en la figura 3.70. La figura 3.70a muestra el voltaje de salida del grupo positivo y la figura 3.70b muestra el voltaje de salida del grupo negativo. El voltaje de salida $V_{Carga}(t)$ a través de la toma central de la inductancia es

$$V_{Carga}(t) = \frac{V_{Pos}(t) - V_{Neg}(t)}{2}$$

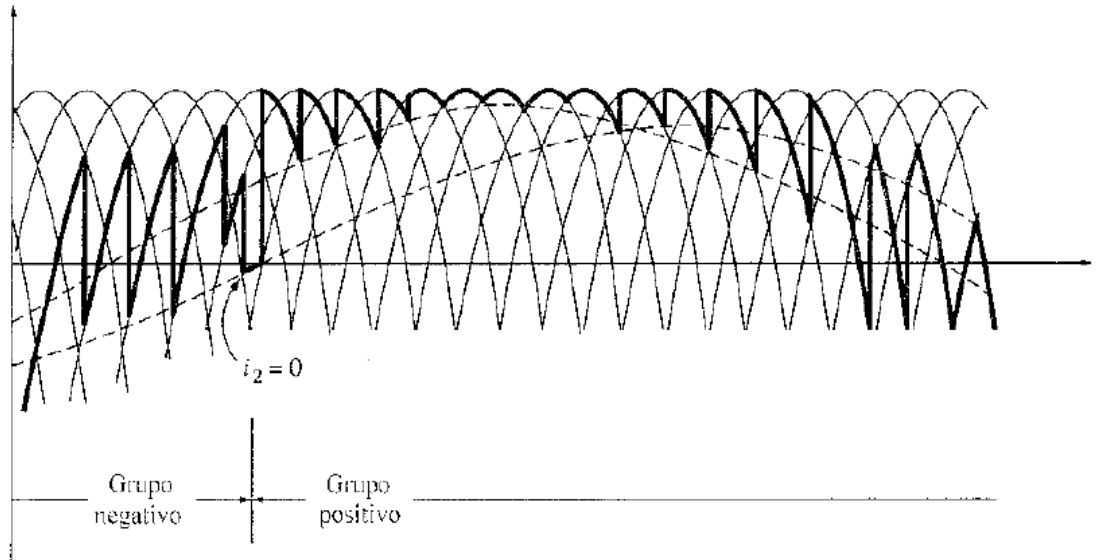


Fig. 3.68 Salida del voltaje y corriente de un cicloconvertidor de corriente no circulante conectado a una carga inductiva.

Muchas de las componentes armónicas de alta frecuencia que aparecen cuando se examinan por separado los grupos positivo y negativo son comunes a los 2 grupos; por tanto, se cancelan durante la sustracción y no aparecen en las terminales del cicloconvertidor.

Algunos cicloconvertidores de corriente re circulante son más complejos que el mostrado en la figura 3.68.

3.2.8 Problemas de armónicas.

Las componentes y circuitos electrónicos de potencia son tan flexibles y útiles que controlan en la actualidad entre 50 y 60% de la carga total de los sistemas de potencia en el mundo desarrollado. Como resultado, el comportamiento de estos circuitos e1ectronicos influye fuertemente en la operación total de los sistemas a los cuales se conectan.

El principal problema asociado a la electrónica de potencia son las componentes armónicas de voltaje y de corriente inducidas en los sistemas de potencia por la conmutación transitoria en los controladores electrónicos de potencia. Estas armónicas incrementan los flujos de corriente total en las líneas (en especial en el neutro de los sistemas trifásicos de potencia). Las corrientes extras incrementan las pérdidas y el calentamiento en las componentes de los sistemas de potencia, lo cual exige disponer de componentes de mayor capacidad para alimentar las mismas cargas totales. Además, las altas corrientes del neutro pueden disparar los relés de protección y sacar de operación secciones completas del sistema.

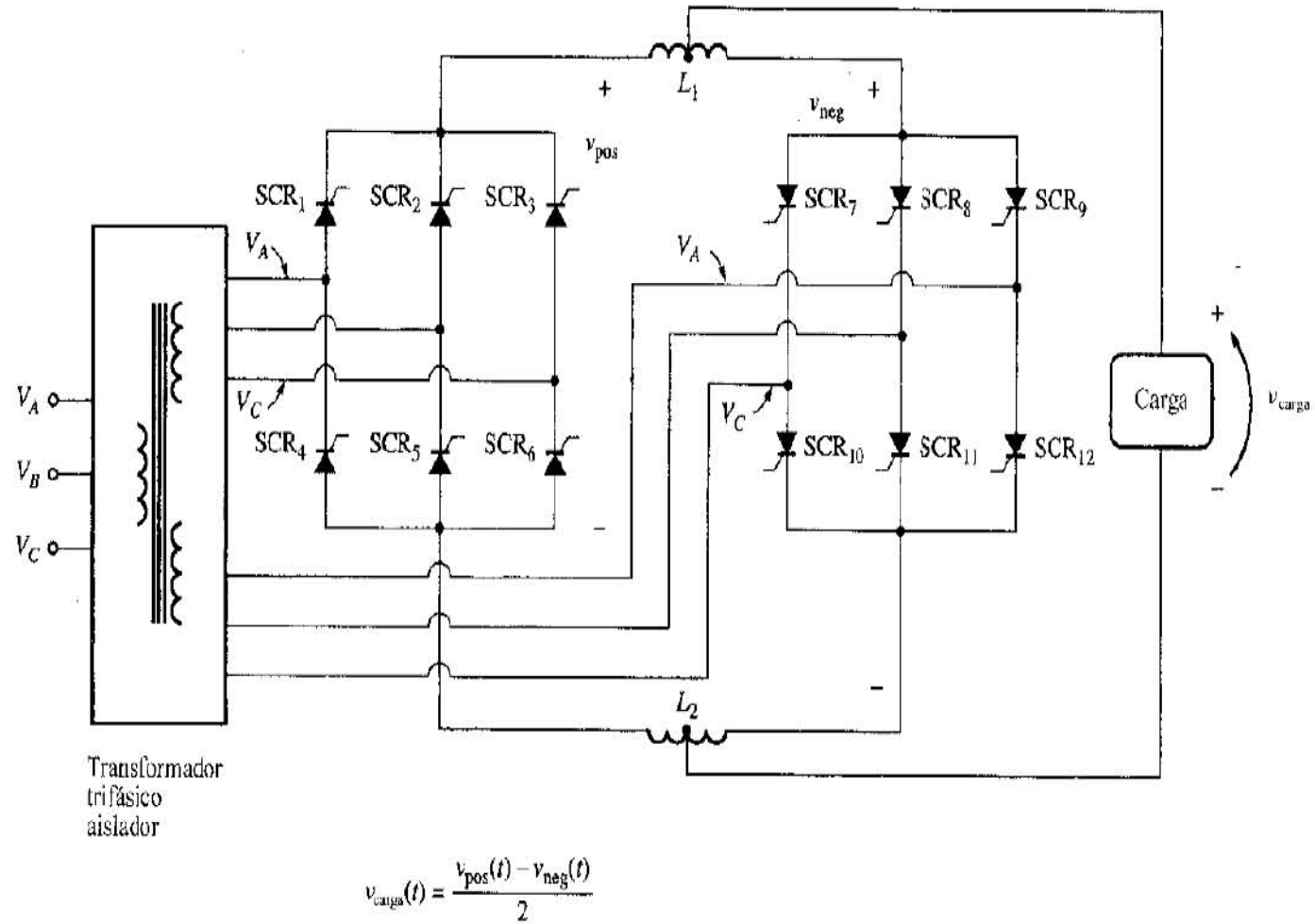


Fig.3.69 Fase de un cicloconvertidor de seis pulsos, del tipo de corriente circulante.

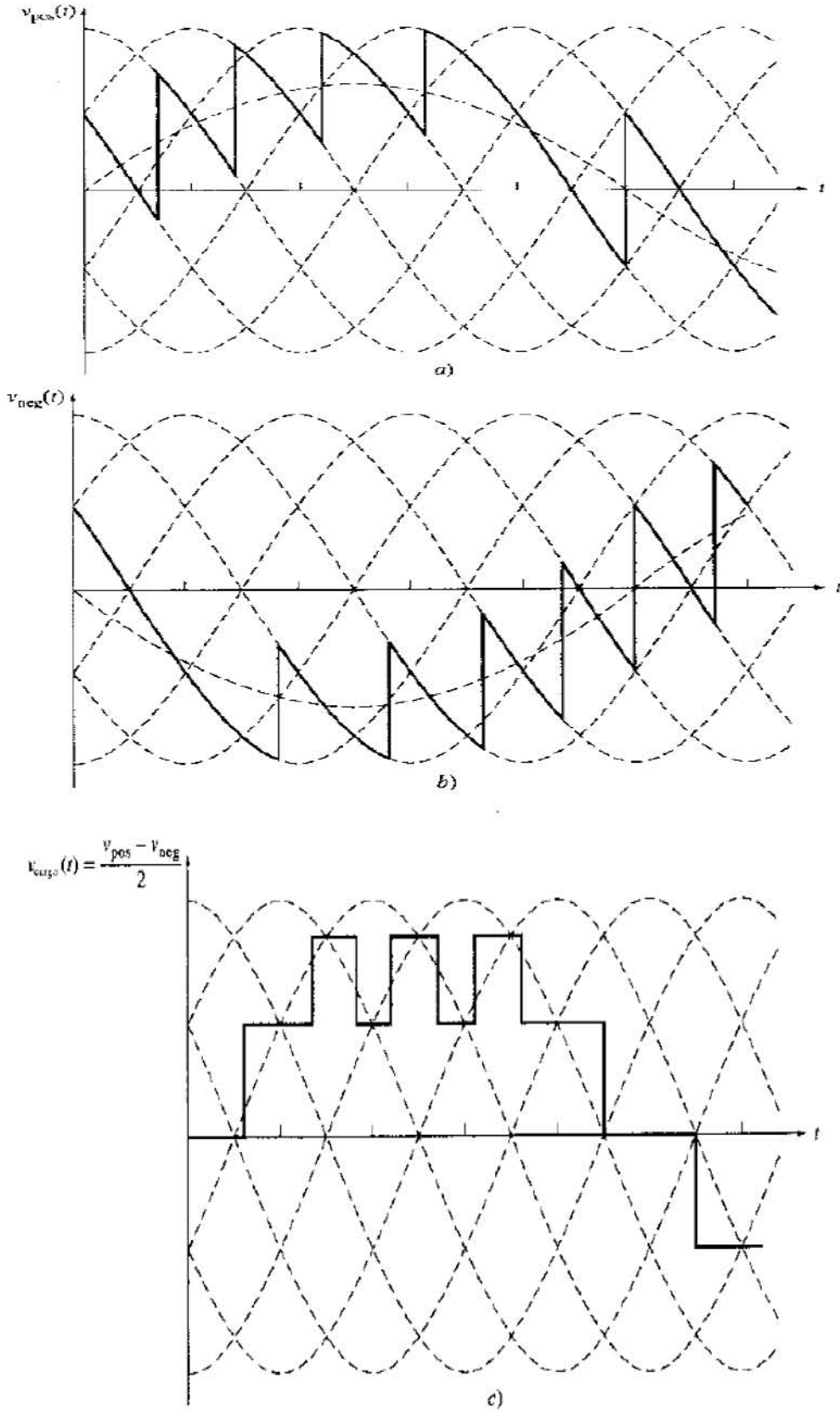


Fig. 3.70 Voltajes del cicloconvertidor de corriente circulante de seis pulsos. a) Voltaje de salida del grupo positivo, b) Voltaje de salida del grupo negativo, c) Voltaje resultante en la carga.



3.3.1 Arrancadores electrónicos o de estado sólido.

Los arrancadores de estado sólido son los tipos más nuevos y flexibles de arrancadores de C. A. a potencia reducida. Son muy diferentes de cualquier Otro tipo tradicional de arrancadores a tensión reducida, ya que:

1. No requieren de resistores, inductores o autotransformadores externos y tampoco de construcción o alambrado especial del motor.

2. No es necesario el uso de desconexión mecánica para arranque y paro.

El control de las desconexiones tiene lugar en un circuito de control de baja potencia, el mantenimiento en este caso es mínimo, ya que no se tienen contactos.

3. No se requieren de enlaces mecánicos para cambiar de baja a alta potencia. Algunos modelos tienen un contactor que dejan fuera al arrancador, conectando directamente el motor a la línea. Lo desconectan hasta que el motor ha alcanzado su velocidad nominal, sin embargo no tienen capacidad para manejar altas corrientes a través del interruptor electrónico de arranque.

En muchos aspectos, los arrancadores de estado sólido de C. A. son similares a los controladores de estado sólido de C. D., ya que en ambos casos se usan rectificadores de silicio controlado (SCR).

La otra diferencia importante es que la mayoría de los arrancadores de estado sólido operan durante el arranque del motor (y algunas veces en el paro) únicamente, es decir, no intervienen en el control de velocidad, ya que no hay control de velocidad después de que el motor ha arrancado. Hay distintos tipos de control para el arranque de motores con arrancadores de estado sólido. Los distintos tipos de cargas arrancan mejor con un modo particular de arranque.

El modo de control equivocado o un ajuste impropio puede causar una operación no satisfactoria y un daño en el motor.

El control de arranque con arrancadores de estado sólido precisan que:

- La corriente del motor depende del voltaje y la velocidad.
- El par mecánico del motor es proporcional al cuadrado del voltaje.

Si un motor se conecta directamente a la alimentación, el voltaje permanece prácticamente sin cambio, no importa que corriente demande el motor. La corriente en este caso depende casi totalmente de la velocidad. Cuando un motor se energiza a través de un arrancador de estado sólido, el voltaje en el motor es variable, a cualquier velocidad la corriente es proporcional al voltaje.

1. El voltaje en un arrancador de estado sólido depende del ángulo de disparo en
2. el SCR, como se muestra en la siguiente figura:

Existe el llamado arranque suave, donde se requiere mayor tiempo durante el cual el motor demanda corriente reducida y produce un par reducido.

Distintos arrancadores usan diferentes modos operacionales

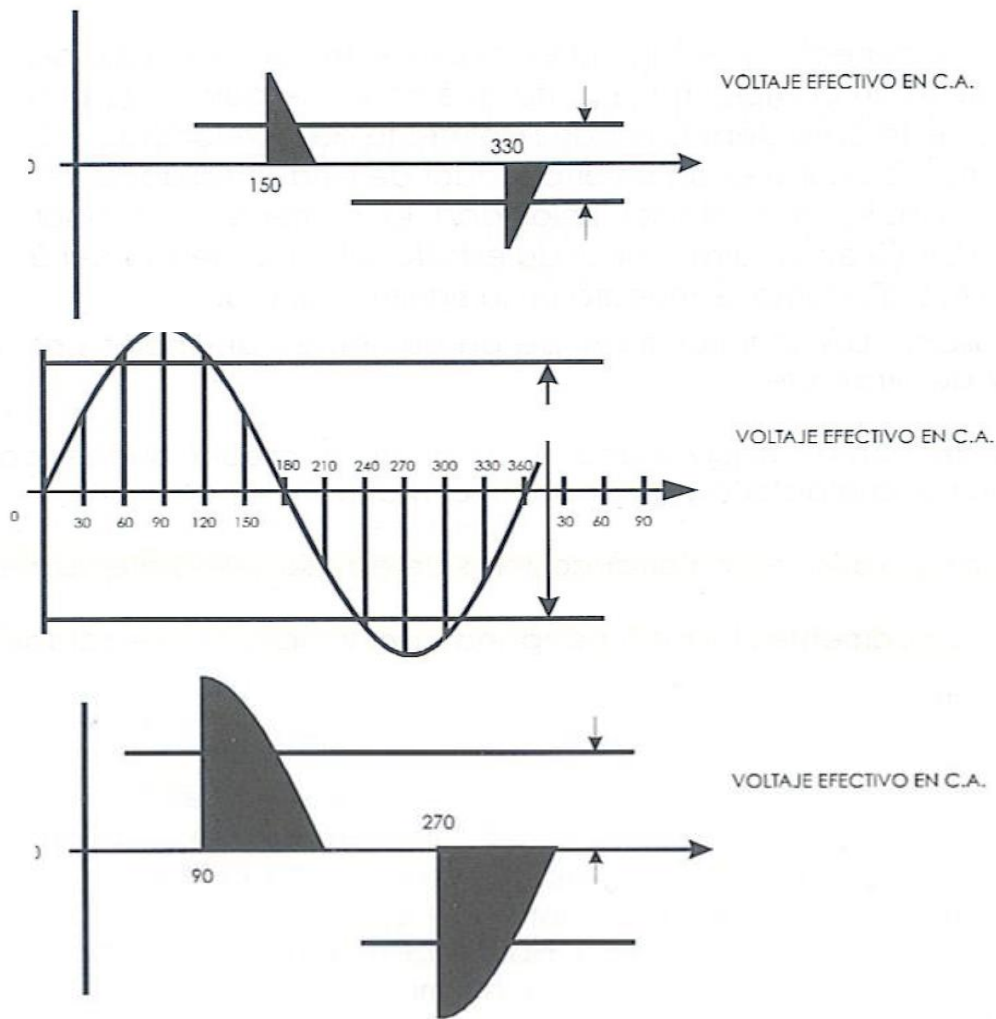


Fig.3.71 Angulo de disparo del SCR y salida de voltaje.

Muchos arrancadores de estado sólido controlan el arranque monitoreando y limitando la corriente al motor. Un transformador de corriente montado en una o más de las líneas de alimentación, envía una señal a los circuitos de control de tiempo del SCR. Cuando la corriente del motor alcanza el límite de corriente pre ajustado, el ángulo de disparo del SCR aumenta, reduciendo con esto el voltaje de salida y la corriente.

El límite de corriente es usualmente ajustable en el rango de 150-200% a 400-450% de la corriente a plena carga del motor.

Se debe nota que el par mecánico de arranque inicial es considerablemente menor que el par mecánico a plena carga.

1. Para estar seguro que el motor arranca, algunos arrancadores de estado solido proporcionan una rampa de corriente en el tiempo entre dos puntos de ajuste. El rango típico de tiempo es de 1 a 30 segundos.



2. Algunos arrancadores de estado sólido con corriente de rampa proporcionan un breve pulso inicial de corriente a su límite más alto. Esto permite asegurar que las cargas con alta fricción estática siempre arranquen en forma inmediata. Después del pulso, la rampa “brinca” del límite inferior.
3. Algunos arrancadores de estado sólido monitorean y controlan el voltaje del motor. En forma típica, elevan el voltaje desde cero o desde un valor inicial de paso de voltaje hasta algún porcentaje del voltaje de línea.

Un voltaje reducido produce una corriente reducida y un par mecánico reducido también: A cualquier velocidad, la reducción de corriente es proporcional a la reducción del voltaje. El porcentaje de reducción del par mecánico es proporcional al cuadrado de la reducción del voltaje, así $\frac{1}{2}$ del voltaje produce $\frac{1}{4}$ del par mecánico, $\frac{2}{3}$ del voltaje producen $\frac{4}{9}$ del par mecánico, etc.

La rampa de tiempo es generalmente ajustable. Si el motor tiene que arrancar con una carga de alta inercia, la corriente debe ser alta, si la rampa es breve. Una rampa más larga da al motor más tiempo para acelerar la carga y reducir la corriente.

Los tipos más sofisticados de controles para arrancadores de estado sólido, usan un tacómetro para monitorear la aceleración real del motor. Por medio de circuitos de retroalimentación, se compara esta aceleración con una rampa de aceleración lineal pre ajustada.

Principio básico de un arrancador suave

Los arrancadores suaves limitan la corriente y el par mecánico de arranque. El esfuerzo mecánico así como la caída en el voltaje de línea son reducidos. El voltaje en el motor es reducido usando control de fase y se incrementa suavemente hasta el voltaje de línea en un tiempo seleccionable. El arranque y frenado suaves garantizan el mínimo esfuerzo en los dispositivos conectados y aseguran operaciones suaves.

Arrancadores Suaves

Los arrancadores de estado sólido son utilizados cuando se requiere un arranque suave y lento. En lugar de operarlos directamente a plena tensión, se arrancan con aumentos graduales de voltaje mediante el control del ángulo de disparo como se muestra en la siguiente figura. Los arrancadores suaves evitan los disturbios de la red eléctrica y picos de corriente así como los esfuerzos mecánicos que causan desgaste al motor y la máquina que se acciona es decir la maquina impulsada por el motor.

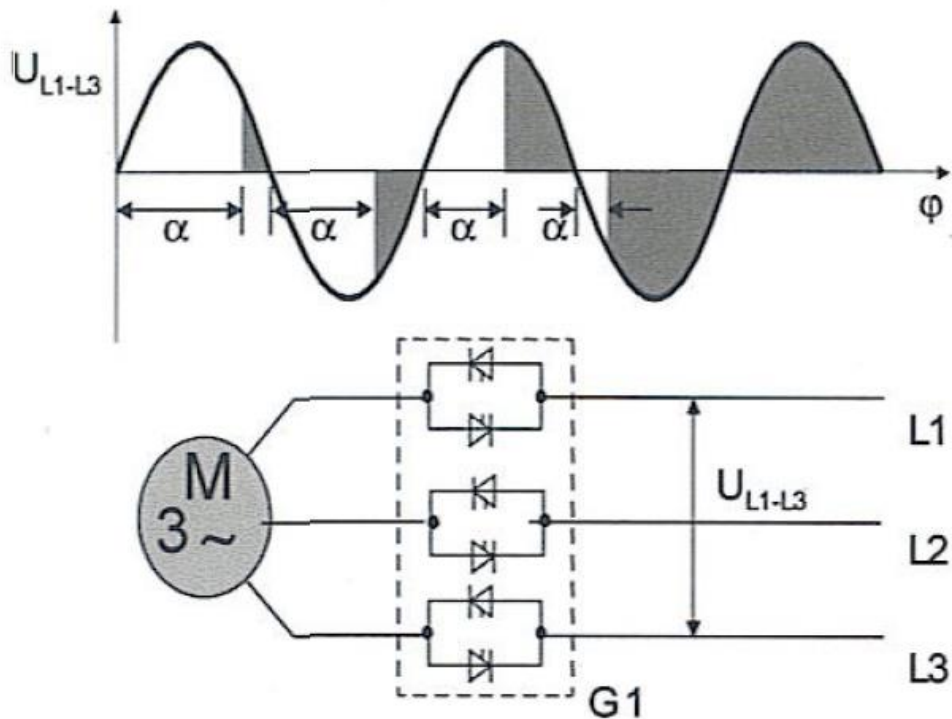
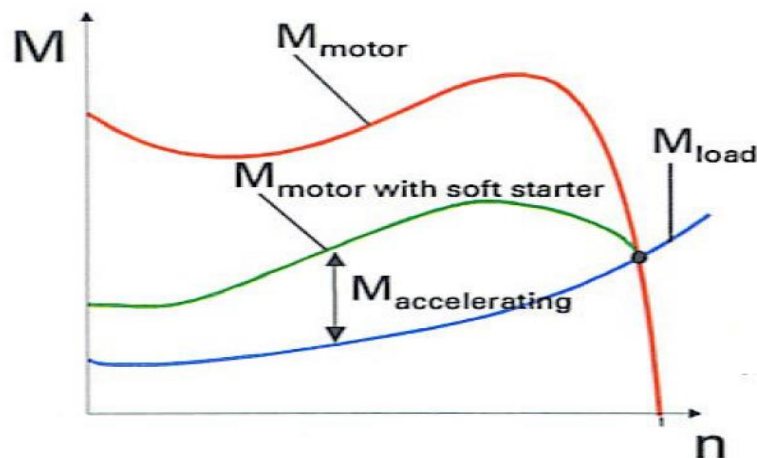


Fig.3.72 Arrancadores suaves.

3.3.2 Principio del control de fase usando elementos semiconductores para arrancadores suaves.

Parada suave. Cuando la maquina es desconectada, se provoca en el motor una parada repentina con un determinado torque opuesto. Para prevenir que los objetos en una banda transportadora se caigan, por ejemplo, una parada suave es posible.

Los arrancadores suaves están adaptados para instalaciones y procesos industriales, ofrecen la mejor opción garantizando arranques optimizados de motores y la perfecta funcionalidad en cualquier aplicación.



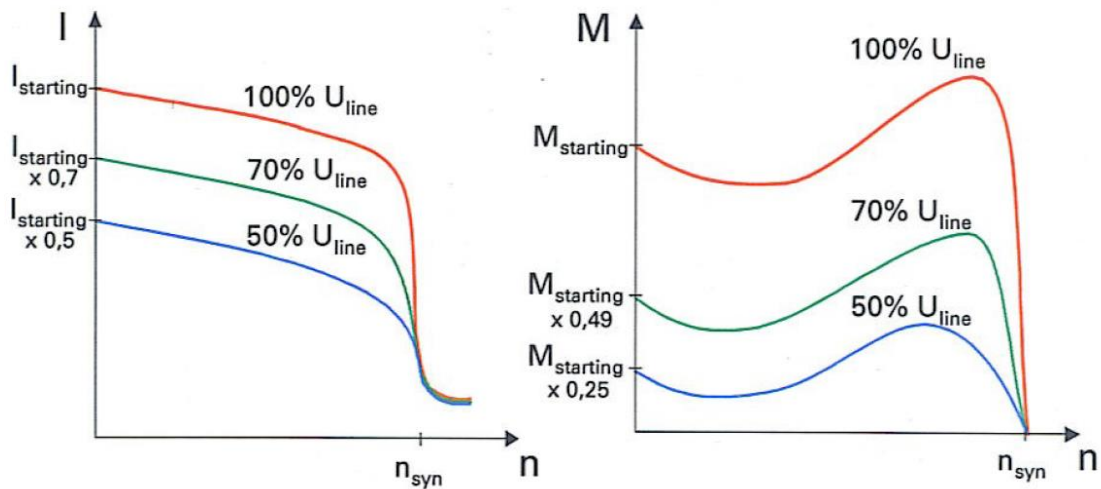


Fig. 3.73 Características típicas de la corriente y el par mecánico o torque cuando se usan arrancadores suaves.

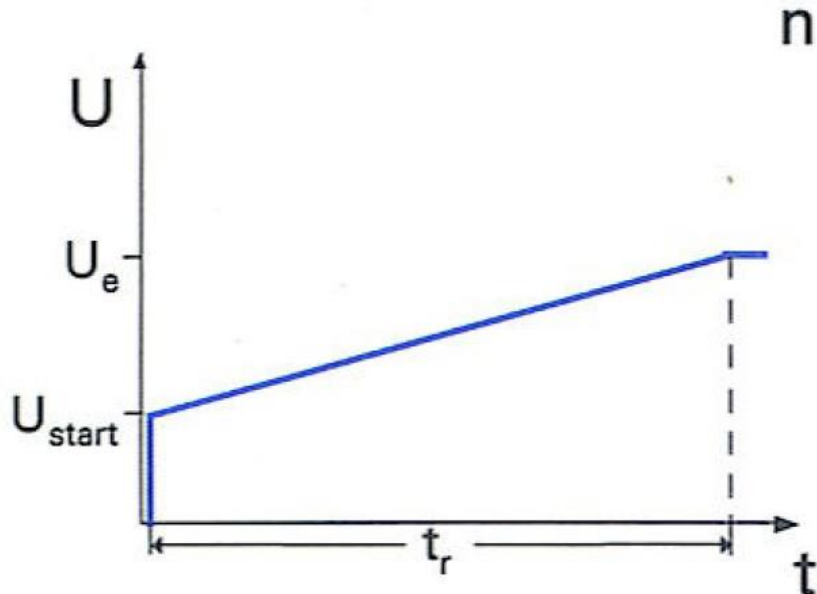


Fig.3.74 Torque carga/motor y voltaje típico en las terminales del motor cuando el motor es arrancado con un arrancador suave.

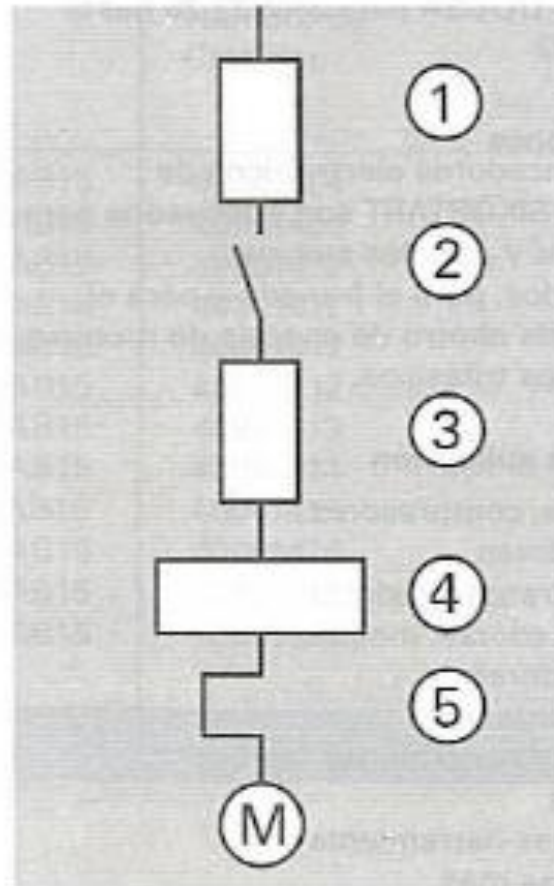
Ejemplo de las características del arrancador suave SIEMENS SIKOSTART 3RW34

El arrancador SIEMENS SIKOSTART 3RW34 permite arranques y paradas controladas. Se caracteriza por su control en las tres fases y tiristores dimensionados para operación continua. Puede ser operado alternativamente usando un contacto de puenteo externo (bypass) controlado por un contacto auxiliar integrado.

El arrancador SIKOSTART 3RW34 puede ser usado casi en cualquier aplicación, por ejemplo:



- Ventiladores.
- Bombas.
- Compresores.
- Bandas transportadoras.
- Maquinas textiles.
- Centrifugas.
- Mezcladores.



- ① Fusible principal o interruptor termomagnético
- ② Contactor (opcional)
- ③ Fusible sitor o silice (opcional)
- ④ Sikostart
- ⑤ Relevador bimetálico

Fig.3.75 La conexión del arrancador suave no se requiere de mayores conexiones; solo la alimentación de 440 V o 220 V al interruptor termo magnético, y del relevador térmico de sobrecarga bimetálico IEC al motor.



3.3.3 Circuito derivado de fuerza de un motor, con arrancador de estado sólido.

Información detallada.

¿Cómo se ajustan los parámetros de un arrancador suave?

El tiempo y voltaje de arranque así como el tiempo de frenado pueden ajustarse fácilmente mediante potenciómetros. Los valores pueden ser finamente ajustados con los rangos usuales.

Esto también aplica para arrancadores suaves con protección de sobre velocidad: la corriente nominal del motor, clase de disparo, y límite de corriente pueden ser ajustados por medio de potenciómetros. El amplio rango de funciones de la gama de arrancadores suaves de fabricantes líderes en estos equipos es rápidamente establecido en un ambiente amigable usando un teclado con menú gráfico, esto significa que es extremadamente simple la puesta en marcha y la solución de problemas en los dispositivos.

Ejecuciones para una amplia gama de aplicaciones.

Existen los arrancadores electrónicos poseen dos ejecuciones diferentes. La ejecución estándar contiene las funciones de arranque y parada suaves con los tres parámetros de ajuste (tiempo de arranque t_{RCON} , tensión de arranque U_s y tiempo de parada t_{RDES}). Una variante especial para la regulación de motores Dahlander (motores de polos consecuentes o de polos conmutables) posee además dos funciones de arranque suave. Así se puede seleccionar una de las dos por medios de entradas separadas. Un potenciómetro permite ajustar diferentes tiempos de arranque t_{R1} y t_{R2} . La tensión de arranque U_s es válida para ambas funciones.

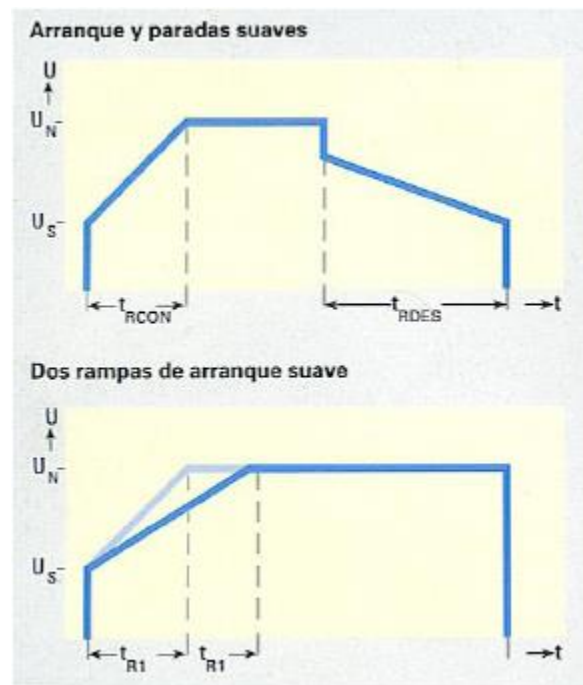


Fig.3.76 Característica de arranque y parada de un arrancador suave.



3.3.4 Comparación con los arrancadores a tensión reducida por el método de conexión estrella – delta.

Los arrancadores electrónicos ofrecen frente al arranque directo las siguientes ventajas:

Protegen al motor, reduciendo el par mecánico de arranque del mismo y aseguran la alimentación frente a picos peligrosos, ya que disminuyen el consumo de corriente. El control por corte de fases de los arrancadores electrónicos alimenta al motor en el inicio con una tensión reducida. Dicha tensión se incrementa gradualmente, con lo que se evitan los efectos producidos en la conmutación o los generados por ejemplo con los arrancadores a tensión reducida método Estrella – Delta. Una vez que el incremento de tensión se ha realizado adecuadamente, el motor se alimenta directamente con la tensión plena de la red de distribución de energía eléctrica.

Por todo ello, los arrancadores electrónicos representan una alternativa de calidad.

Arranque y paradas suaves.

No solamente se puede realizar un arranque con par reducido como en el caso de los arranques estrella – delta, sino que también se evita la inercia del accionamiento cuando se produce la desconexión del motor, a través de una función integrada de parada suave.

Comparación con los arrancadores estrella – delta.

Las combinaciones estrella – delta son hasta tres veces más anchas: un arrancador estrella – delta de 22 KW ($22 \text{ KW} \times 1.341 = 29.50 \text{ H. P.}$, por aproximación 30 H. P.) tiene un ancho de $3 \times 55\text{mm} = 165\text{mm}$, mientras que un arrancador electrónico tiene una anchura de $1 \times 55\text{mm}$. En cuestión de cableado, el arrancador electrónico también queda por delante: en vez de seis conductores que parten desde el arrancador hacia el motor, los arrancadores electrónicos necesitan únicamente tres.

Circuito de conexión.

Adicionalmente los arrancadores electrónicos SIEMENS SIKOSTART 3RW34 Permiten dos tipos de conexiones que se seleccionan con un micro interruptor integrado: circuito estándar y circuito en delta interior.

En el circuito estándar los tiristores están en línea con el motor y se tienen tres cables dispuestos entre el arrancador suave y el motor, mientras que en el circuito delta interior, los tiristores se encuentran dentro de la delta del motor con lo cual, el arrancador suave solo tiene que conducir el 58% de la corriente que consume el motor y de ese modo es posible por ejemplo operar un motor de 100 Amperes usando un arrancador de 58 Amperes. Lo que representa beneficios significativos en cuanto a tamaño y costo respectivamente.

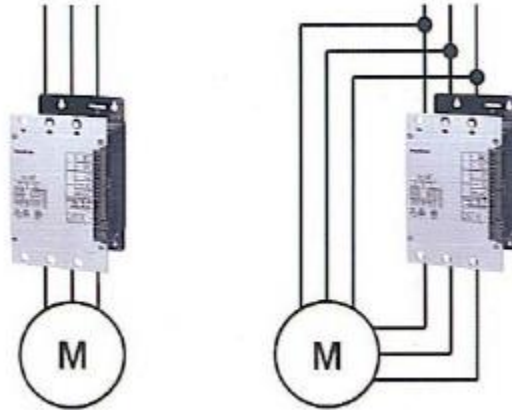


Fig. 3.77 conexión de arrancador suave.

Características de operación.

Voltaje de operación de 200 V a 460 V.

Voltaje de control de 120 V. c. a. +/- 10%.

Voltaje inicial de arranque ajustable de 30% a 80% del voltaje nominal.

Tiempo de arranque ajustable de 0.5 segundos a 60 segundos.

Tiempo de parada ajustable de 0.5 segundos a 60 segundos.

Rango de temperatura de operación -25oC a +60oC.

¿Cuáles son las ventajas de la conexión delta interior?

Con la conexión delta interior, las fases del arrancador suave se conectan en serie con los bobinados individuales del motor. Esto significa que el arrancador suave solo tiene que conducir el 58% de la corriente nominal del motor (corriente de línea).

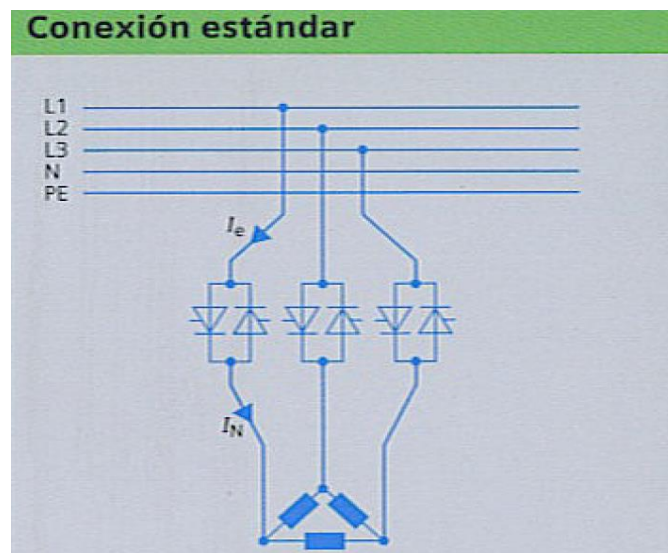


Fig.3.78 conexión estándar de arrancador suave. La corriente nominal I_e del arrancador vale lo mismo que la corriente nominal del motor I_N , 3 cables el motor.

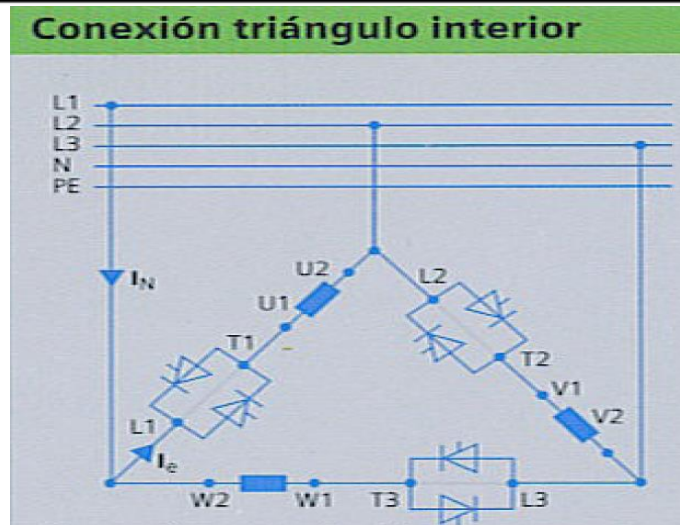


Fig.3.79 Conexión triángulo interior de arrancador suave. La corriente nominal I_e del arrancador vale el 58% de la corriente nominal del motor I_N , (6 cables en el motor los mismos en arrancadores estrella- triángulo).

Circuito estándar.

La corriente de línea I_R del motor fluye a través de los tiristores del arrancador suave, tres cables dispuestos entre el motor y el arrancador suave.

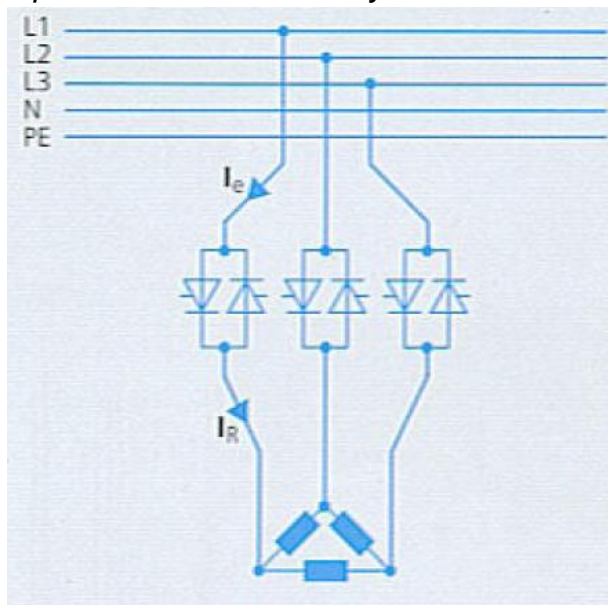


Fig. 3.80 circuito estándar entre el motor y el arrancador suave. La corriente Nominal I_R del arrancador corresponde a la corriente nominal del motor I_R (3 cables al motor).

Circuito en triángulo interior

Una gran ventaja el arrancador suave solo tiene que conducir la corriente de fase del motor aproximadamente el 58% de la corriente I_R (las corrientes de línea y dentro del circuito triángulo presenta una relación $\sqrt{3}:1$). Los tiristores del arrancador están conectados en las fases del motor.



Esto resulta en beneficios significativos por lo que a tamaño respecta.

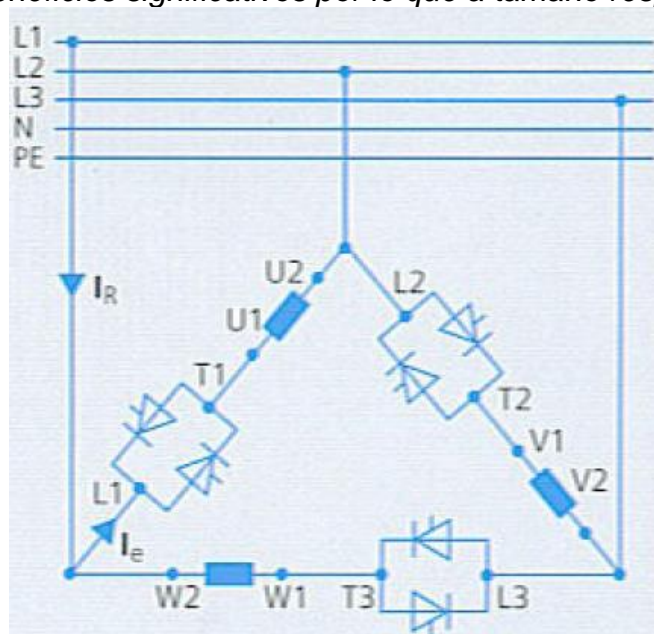
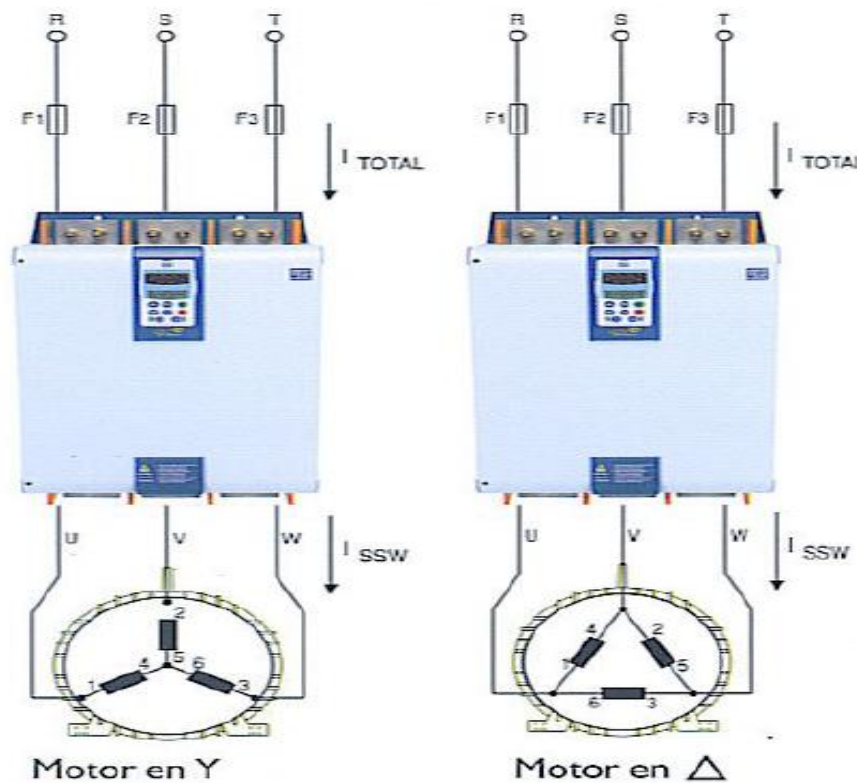


Fig. 3.81 conexión interior de un arrancador suave. La corriente nominal del arrancador I_e corresponde al 58% de la corriente nominal del motor I_R , (6 cables al motor igual que un arranque estrella-triángulo).

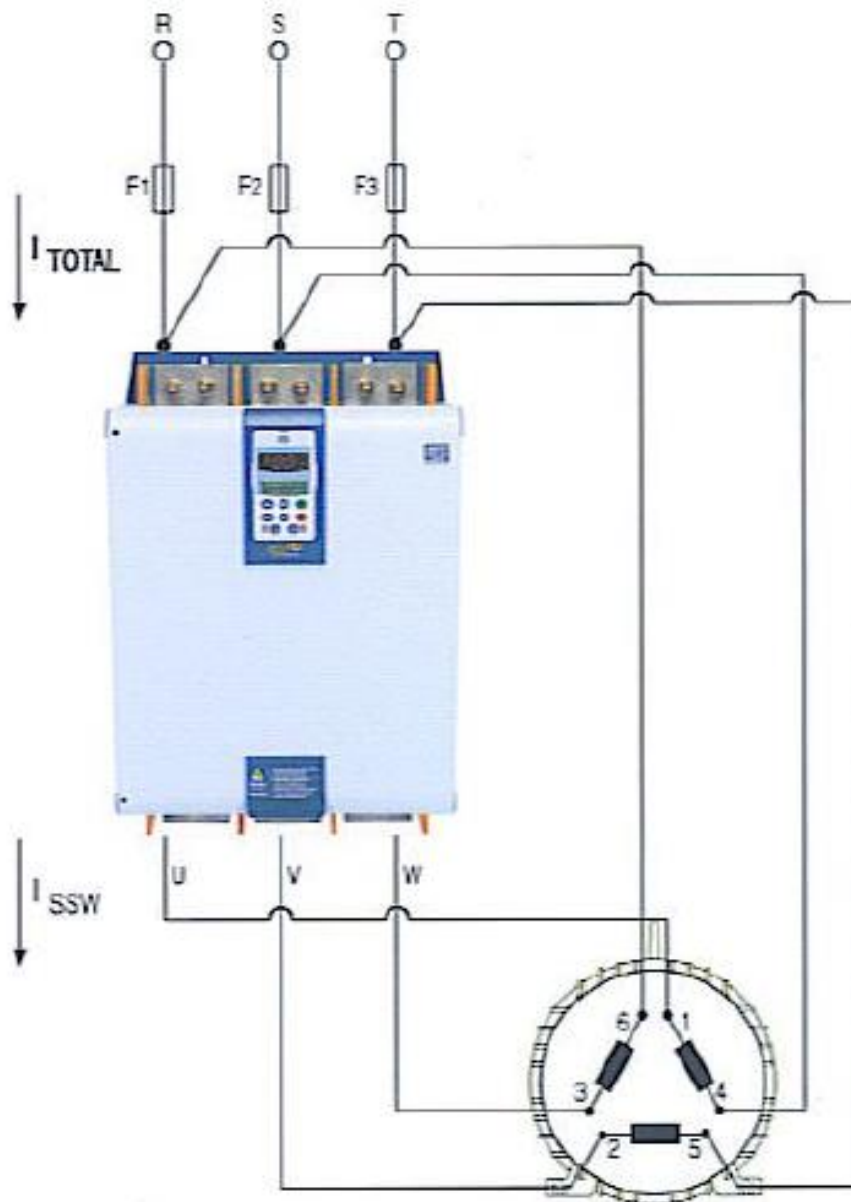
3.3.5 Tipos de conexiones del arrancador suave al motor estándar (3 cables).



$I_{\text{arrancador suave}} = I_{\text{Total consumida}}$
Fig.3.82 conexión arrancador suave estándar.



Adentro del triángulo del motor (6 cables).



Arrancador Suave dentro del triángulo del motor

$$I_{\text{Soft-starter}} = \frac{I_{\text{Total consumida}}}{1,5} = 67\% I_{\text{Total consumida}} \text{ (Durante el arranque)}$$

Fig.3.83 Arrancador suave dentro del triángulo del motor.



- En la conexión padrón (3 cables), el motor puede ser conectado en Y(estrella) como en Δ (triangulo).
- En la conexión dentro del triángulo del motor solamente puede estar conectado en triangulo.

La tabla siguiente, presenta las tensiones disponibles para los diferentes tipos de motores:

Motor	Conexión 6 cables
220V- Δ / 380V-Y	220V- Δ
380V- Δ / 660V-Y	380V- Δ
440V- Δ / 760V-Y	440V- Δ
575V- Δ	575V- Δ
220V- Δ / 380V-Y	220V- Δ
440V- Δ / 760V-Y	440V- Δ

Tabla 24 tensiones para diferentes tipos de motores

- Para una misma potencia del motor, en la conexión del triángulo del motor (6 cables), el arrancador suave es 43% menor que el arrancador suave en la conexión tipo estándar (3 cables).
- La conexión dentro del triángulo del motor (6 cables), posibilita arrancar un motor de potencia 73% mayor que en la conexión tipo estándar (3 cables).
- La conexión dentro del triángulo necesita 6 cables dentro del motor.
- Durante el arranque la corriente del motor puede ser de hasta 1,5 veces mayor que la corriente del arrancador suave.
- Después del arranque, ya a tensión plena la corriente del motor puede ser hasta 1,73 veces mayor que la corriente del arrancador suave.

Arrancador Armado SIEMENS con SIKOSTART 3RW34

El arrancador suave ensamblado integra funciones de control, protección e indicación para motores trifásicos de hasta 300 H. P.

Funciones de protección.

Protección por sobrecarga y por corto circuito. Para asegurar la integridad de los tiristores del arrancador se usan fusibles de acción ultra rápida, los cuales están diseñados especialmente para protección de semiconductores.

El arrancador está totalmente alambrado en conexión estándar (tres conductores al motor) y contactor de puenteo, lo que evita perdidas por calor y permite alojarlo en un gabinete NEMA 12.

El Arrancador armado SIKOSTART Armado incluye:

- Arrancador Suave SIKOSTART 3RW34.
- Control en 120 V. c. a.
- Interruptor Termomagnético.



- Fusibles ultrarrapidos SITOR 3NE4.
- Contactor de Bypass.
- Transformador de control.
- Protección con interruptor 55X1 en el circuito de control.
- Estación de botones de “arranque” y “paro”.
- Lámparas indicadoras para “arranque”, “paro” y “sobrecarga”.
- Voltímetro digital.
- Ensamble y alambrado en gabinete NEMA 12.

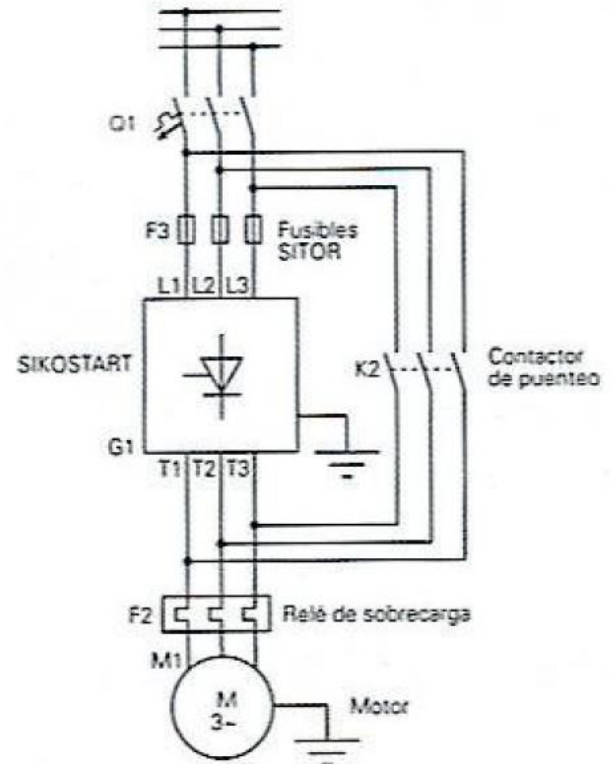
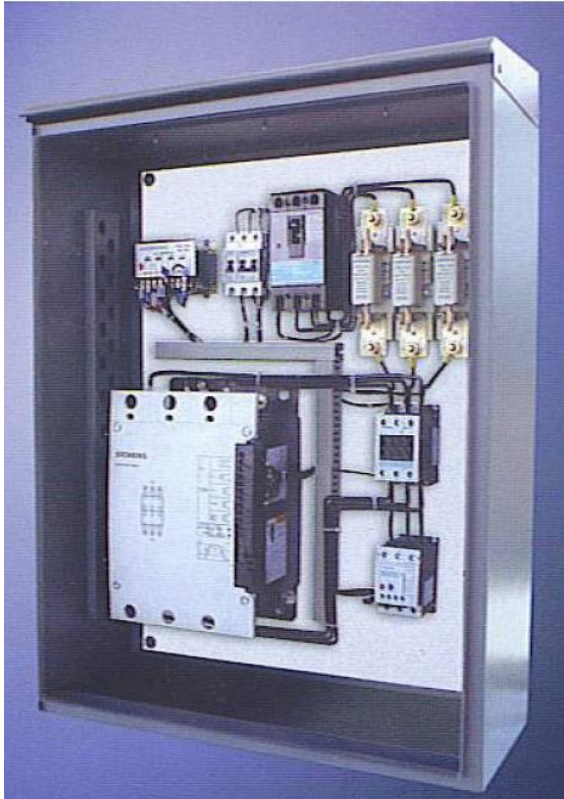


Fig.3.84 Representación física y esquemática de un arrancador suave.

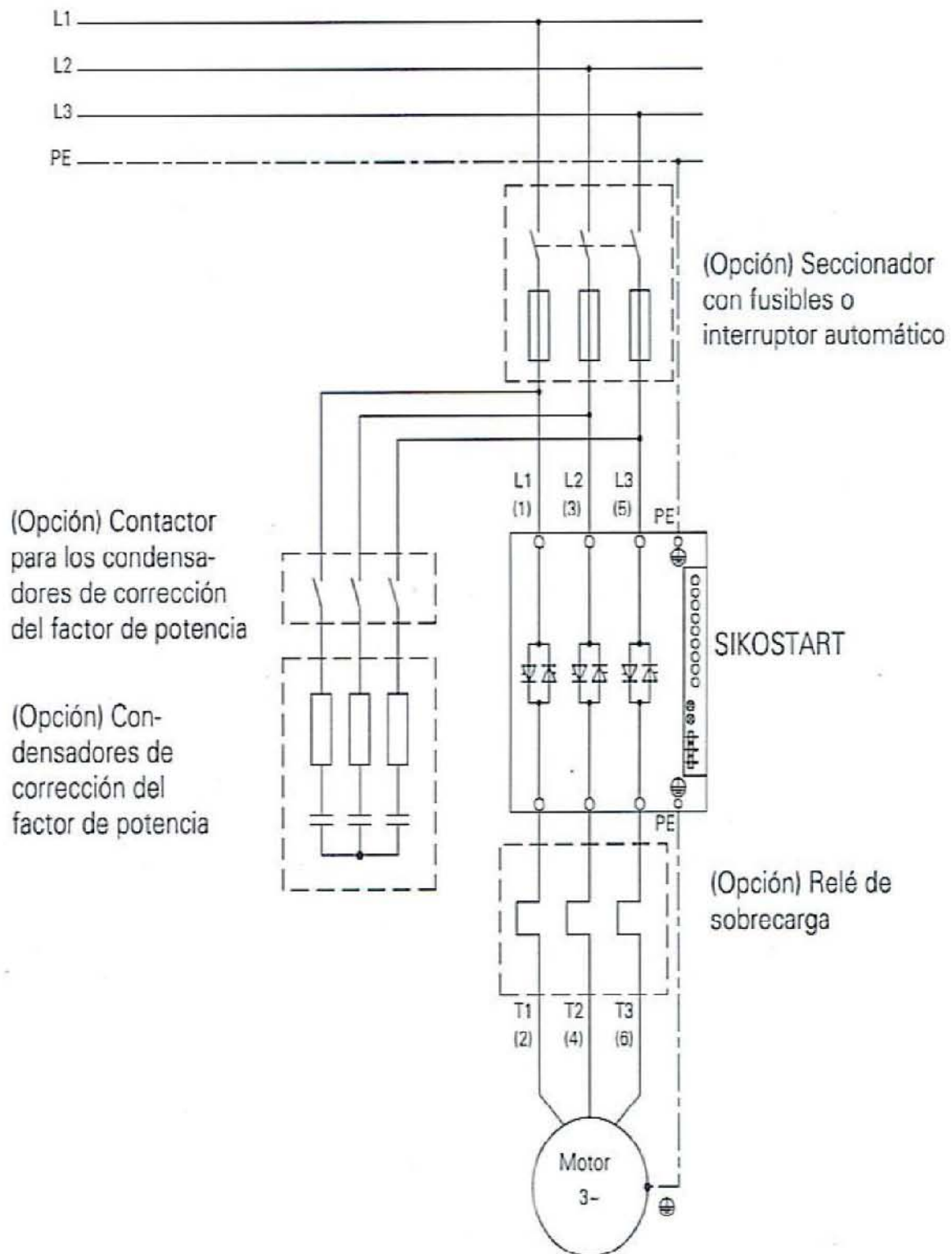


Fig. 3.85 Diagrama del circuito derivado de fuerza de un motor de inducción de c.a. con arrancador de estado sólido electrónico SIEMENS SIKOSTART 3RW34, así como con capacitores estáticos conectados para corregir el factor de potencia ($\cos \varnothing$) del motor.



3.3.6 Arranques secuenciales.

Para este tipo de arranque la potencia asignada al arrancador elegido, debe de ser como mínimo tan grande como la potencia asignada del mayor de los motores de la secuencia de arranque.

El ajuste de los parámetros para los diferentes motores y/o carga se puede llevar a cabo sin ningún problema, mediante un software de comunicación denominado COM SIKOSTART en los equipos que disponen de interface. Estos equipos permiten la entrada de tres juegos de parámetros diferentes.

También es particularmente adecuado lo anterior, para el arranque de motores de polos consecuentes o polos conmutables en sus diferentes velocidades o bien para la conmutación de una velocidad a otra, ver el siguiente diagrama:

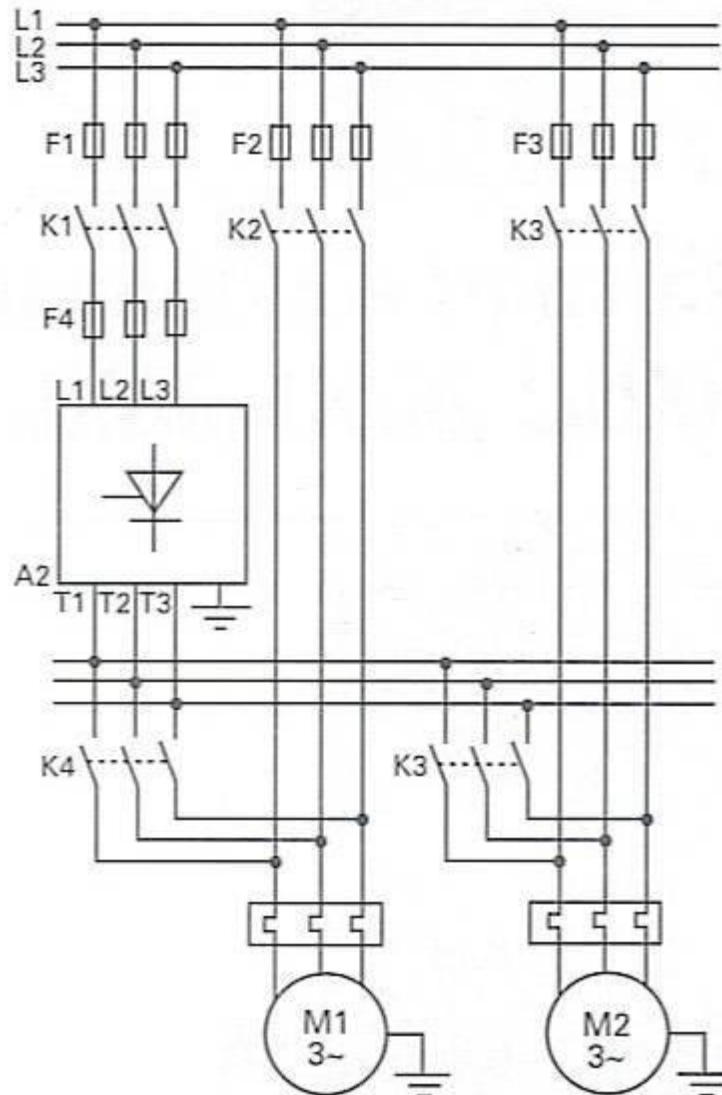


Fig.3.86 Conexión de un arrancador suave, adecuado para el arranque de polos conmutables. Arranque secuencial de varios motores con un sólo arrancador electrónico SIEMENS SIKOSTART 3RW22.



Arranques simultáneos.

En este tipo de arranques, la potencia asignada del arrancador electrónico SIEMENS SIKOSTART 3RW22 en proyecto, debe ser como mínimo tan grande como la suma de las potencias asignadas de todos los motores.

Las cargas deben tener curvas de par mecánico o torque/velocidad y momentos de inercia similares, ver el siguiente diagrama:

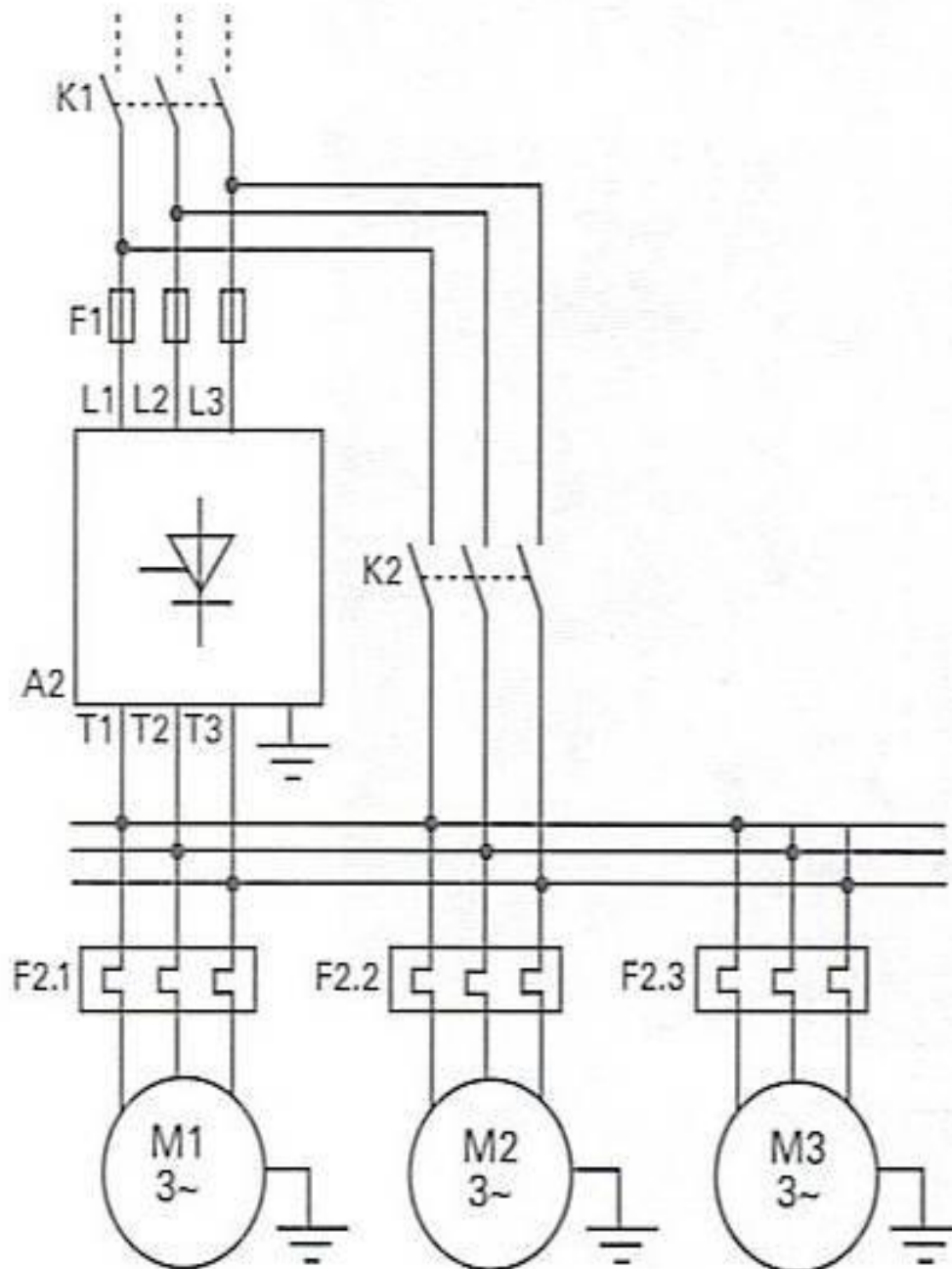


Fig. 3.87 Arranque simultáneo de varios motores con un sólo arrancador electrónico SIEMENS SIKOSTART 3RW22.

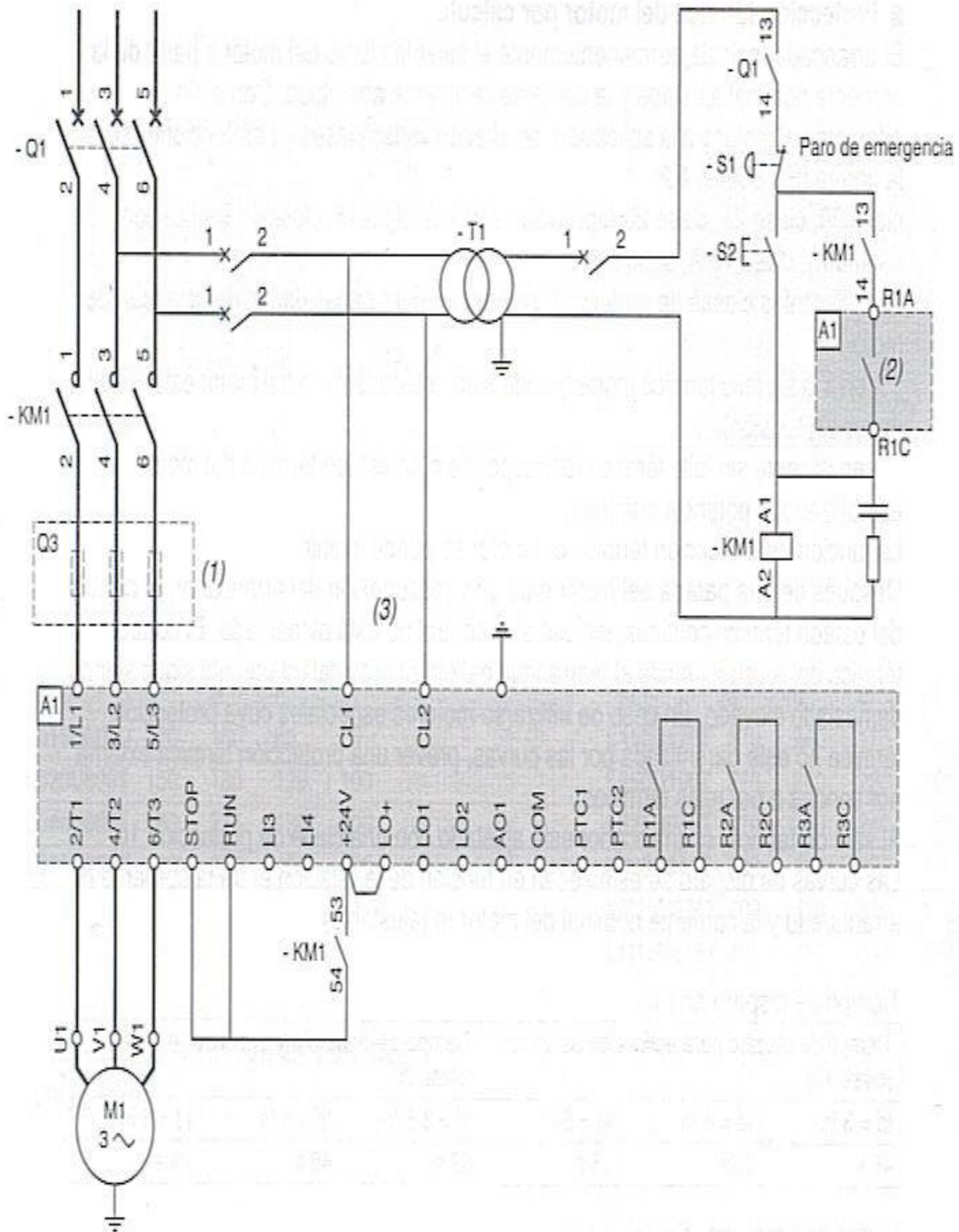


Fig. 3.88 Arrancador de estado sólido de la marca Telemecanique Alistart 48, esquema de aplicación recomendado para un sentido de marcha con contactor de línea.

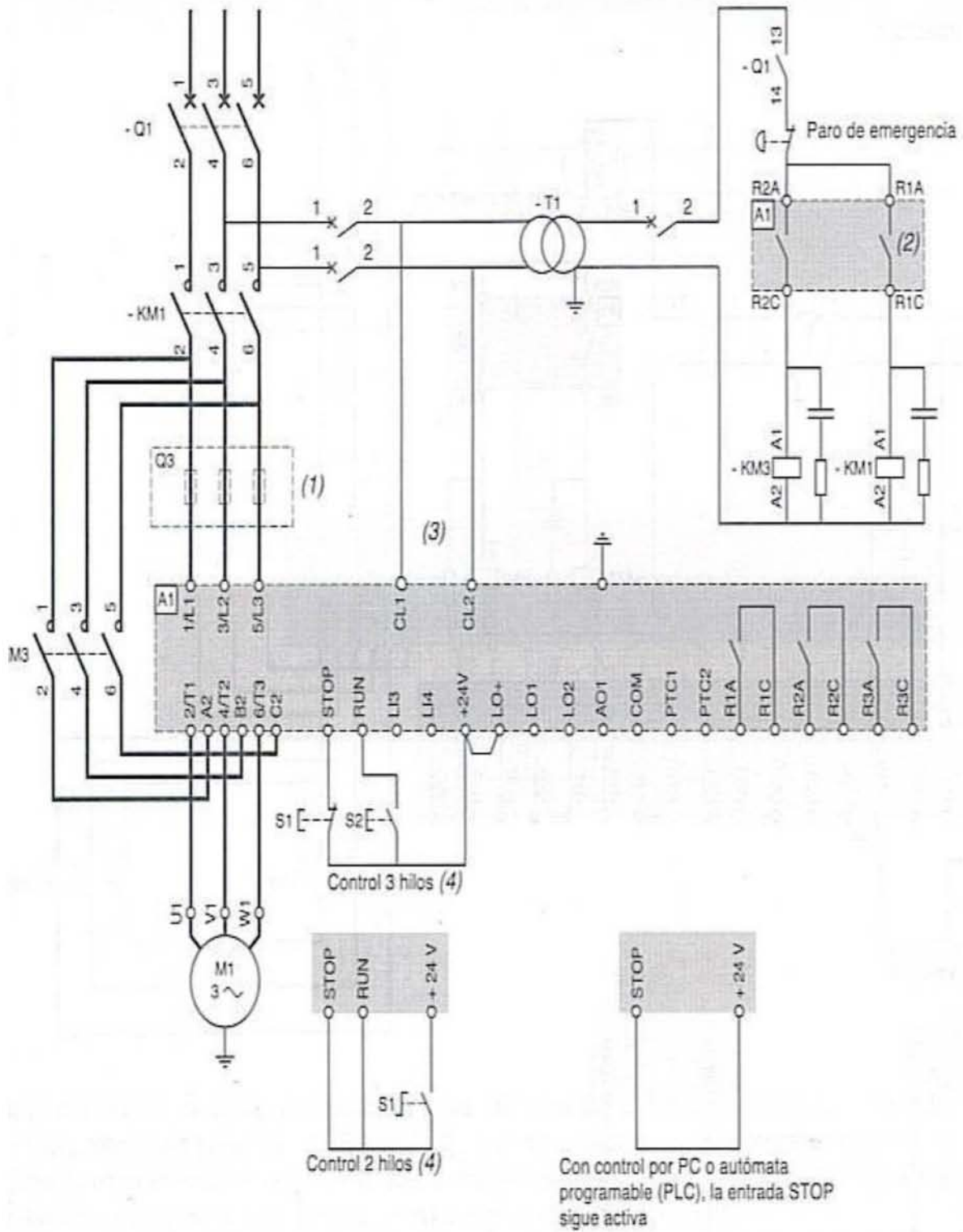


Fig.3.89 Arrancador de estado sólido Telemecanique Alistart 48, esquema de aplicación recomendado para un sentido de marcha con contactores de línea y de by-pass del arrancador.

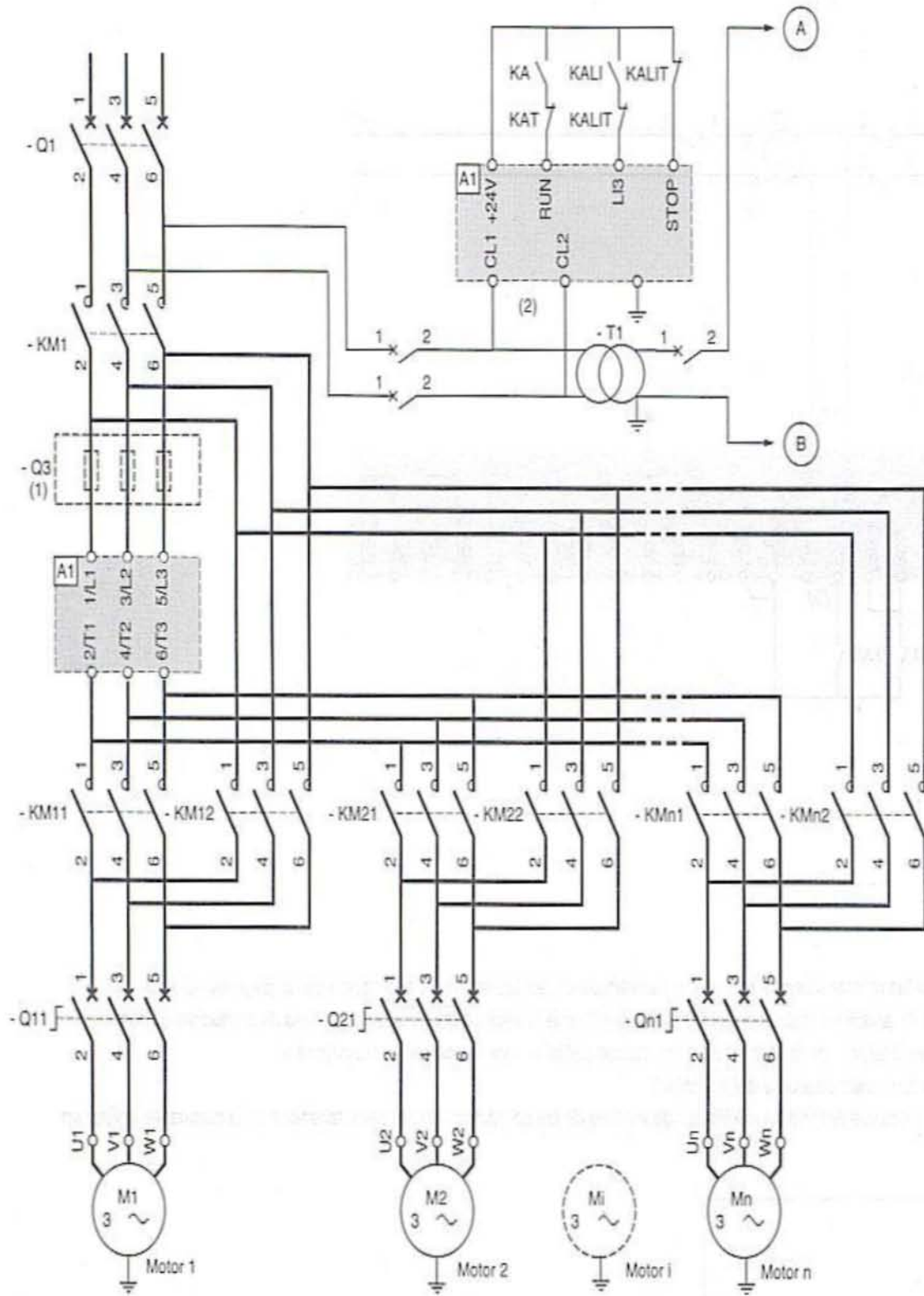


Fig. 3.91 Arrancador de estado sólido Telemecanique Alistart 48, esquema de aplicación recomendado para el arranque de varios motores en cascada con un solo arrancador Alistart 48, un sentido de marcha y contactor de línea.



Fig. 3.92 Arrancador de estado solido de pequeña potencia Telemecanique LH4-N.

Podemos ahora resumir las características de los arrancadores de estado sólido electrónicos de la siguiente manera:

3.3.7 Soft starters “arrancadores suaves”. Arrancadores Electronicos o de estado sólido para motores eléctricos De inducción de c. A.

Funciones que realizan:

1. Alimentan al motor en el arranque con una tensión reducida.
2. Limitan o disminuyen la corriente de arranque.
3. Reducen el par mecánico o torque de arranque del motor.
4. La tensión reducida o voltaje reducido de inicio de arranque se incrementa gradualmente.
5. Una vez que el incremento de la tensión se ha realizado adecuadamente, el motor se alimenta directamente con la tensión plena.
6. Pueden evitar la inercia del accionamiento cuando se produce la desconexión del motor a través de una función de parada suave.
7. Puede conectarse directamente al arrancador un relevador térmico de sobrecarga.
8. Evitan los efectos de conmutación de contactares como sucede en los arrancadores a tensión reducida por los métodos autotransformador, estrella-delta, devanado bipartido, etc.



9. Por medio de potenciómetros se pueden ajustar tanto el tiempo como la tensión de arranque, y, el tiempo de parada del motor. (Tres parámetros de ajuste: tensión de arranque, tiempo de arranque y tiempo de paro).

3.3.8 Arrancador iec inteligente telemecanique tesys u.

Evolución de los arrancadores tradicionales.

Con el cambio de siglo, las tecnologías también cambiaron y ahora en las soluciones de arranque de motor encontramos nuevas opciones. Podemos encontrar arrancadores que no solo ofrecen una solución de arranque de motor si no que además, permiten tener un control más sofisticado de los motores eléctricos de inducción tipo rotor jaula de ardilla trifásicos.

Ejemplo de ello es el arrancador IEC Inteligente de la marca Telemecanique TeSys U, un arrancador de motores que incorpora funciones de protección y control, adaptable a una gran variedad de buses de comunicación que permite monitorea aplicaciones vía Internet.

TeSys modelo U: El arrancador “inteligente”.

TeSys U, es un “dispositivo inteligente”, es el primer arrancador-controlador en el mercado que concentra mucho más inteligencia en un mismo volumen lo cual simplifica su instalación y uso.

Incorpora las funciones de seccionamiento y desconexión de la carga, funciones de control y protección, y se le puede adicionar módulos función y de comunicación.

Algo que se debe hacer notar es, que es muy compacto para arrancar motores de hasta 15 KW en 440 V y diseñado para una máxima modularidad. Todos los componentes tales como: unidades de control, módulos función, bloque de contactos auxiliares, módulos de comunicación, pueden ser integrados fácilmente sobre la base de potencia sin herramientas ni alambrado adicional, lo cual comparado con una solución tradicional, reduce el tiempo de instalación en aproximadamente un 80%.

Especificaciones Técnicas.

Bases de potencia disponibles en dos versiones: 0 a 12 A y 0 a 32 A. 50 KA de capacidad interruptiva en 440 V.C.A., expandible a 130 KA utilizando un módulo limitador.

Unidades de control con solo seis rangos de ajuste para cubrir las corrientes de aplicación de hasta 20 H.P. en 440 V.C.A.

Tensiones de control en 24 V.C.A., 48/72 V.C.A./C.D., 110/240 V.C.A./V.C.D.

Con un ancho de 45 mm (para las bases de potencia).

Bloque reversible adicional de 45 mm para no afectar el ancho cuando se requiera una solución como arrancador reversible.

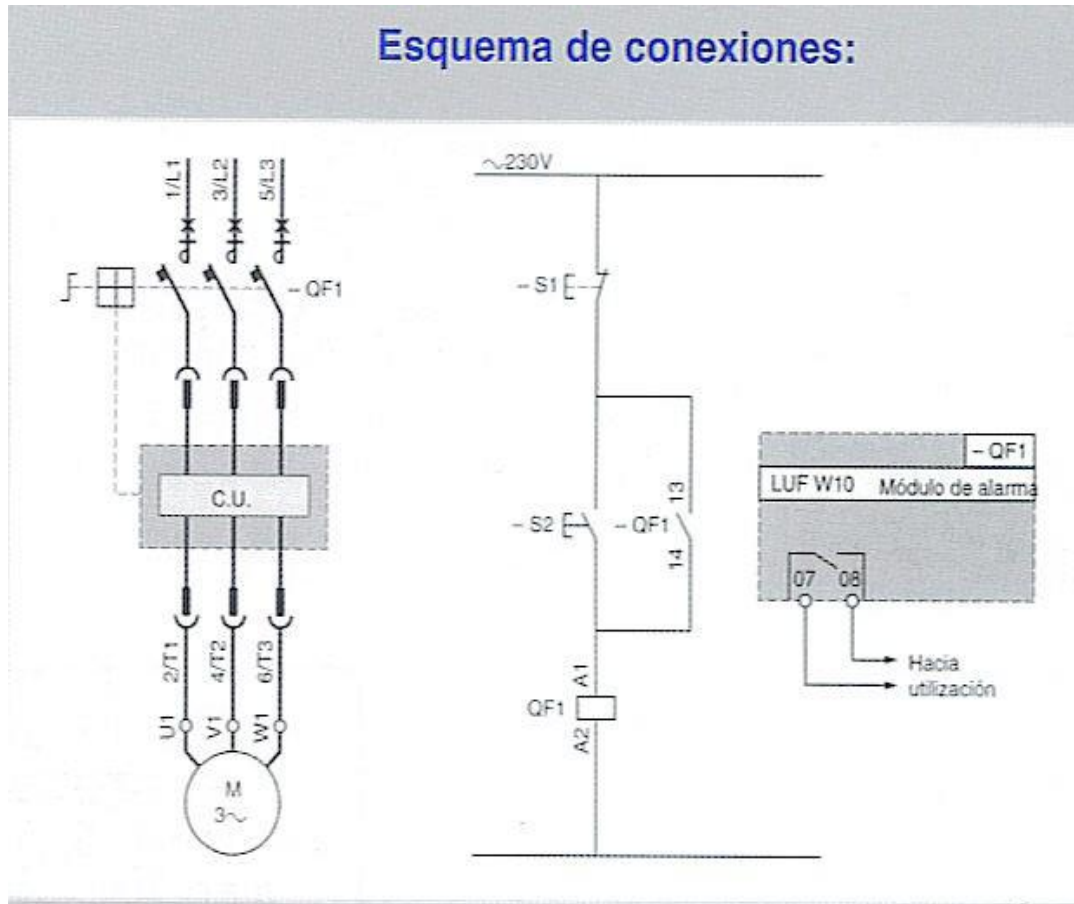


Fig. 3.93 Las unidades de control se ofrecen en tres versiones diferentes: estándar, avanzada y multifunción, que proveen desde una protección básica hasta la protección más avanzada.

Funciones que provee la unidad de control estándar:

Protección de corto circuito, protección de sobrecarga, protección contra desbalanceos de fases, protección contra pérdida de fase, rearme manual.

Funciones que provee la unidad de control avanzada:

Protección de corto circuito, protección de sobrecarga, protección contra desbalanceo de fases, protección contra pérdida de fase, rearme manual o automático por medio de un módulo función.

Funciones que provee la unidad de control multifunción:

Protección de corto circuito, protección de sobrecarga, protección contra desbalanceos de fases, protección contra pérdida de fase, rearme programable manual o automático, señal de alarma de las protecciones, función de supervisión y visualización sobre su pantalla frontal, programación local o remota utilizando un software sobre par y protección contra la operación en vacío de un motor, protección de falla a tierra o falla de aislamiento.

El arrancador TeSys U puede integrarse a las redes de comunicación AS-1 y Modbus, utilizando los módulos de comunicación diseñados para facilitar su



integración a los sistemas de monitoreo.

Soluciones para motores con consumo mayor a 32 Amperes. TeSys U Controlador.

Después del éxito que se ha tenido con el arrancador inteligente TeSysU, ahora con el controlador TeSys U el usuario tiene la posibilidad de integrar a su sistema de comunicación todos los motores de hasta de 800 Amperes y así, monitorear y monitorear en todo momento el estatus de cada uno de ellos sin tener la necesidad de acudir directamente al gabinete que contiene el arrancador o al C.C.M.

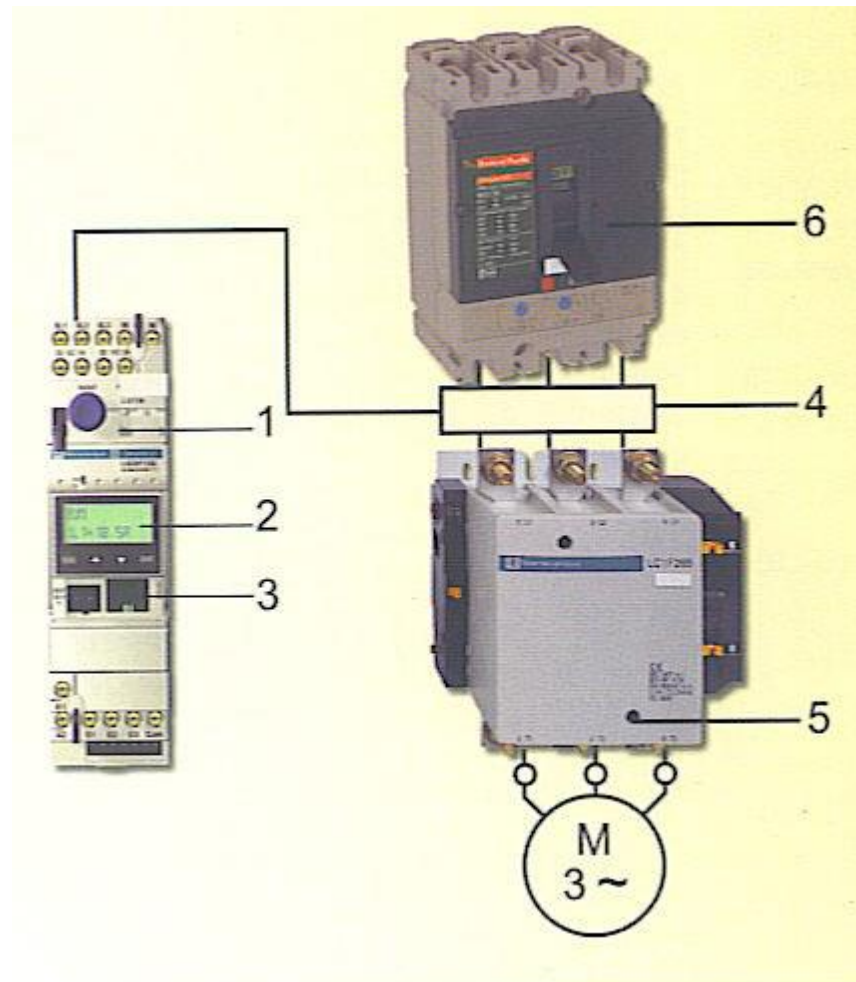


Fig.3.94 ejemplificación de arrancador inteligente.



3.4.1 Relé de estado sólido (SSR).

El relé de estado sólido (SSR) es un elemento que permite aislar eléctricamente el circuito de entrada o mando y el circuito de salida.

Las diferentes partes que forman un SSR son:

- Circuito de entrada
- Aislamiento, está asegurado generalmente por un acoplamiento óptico con semiconductor (Fotoacoplador, fototriac,...)

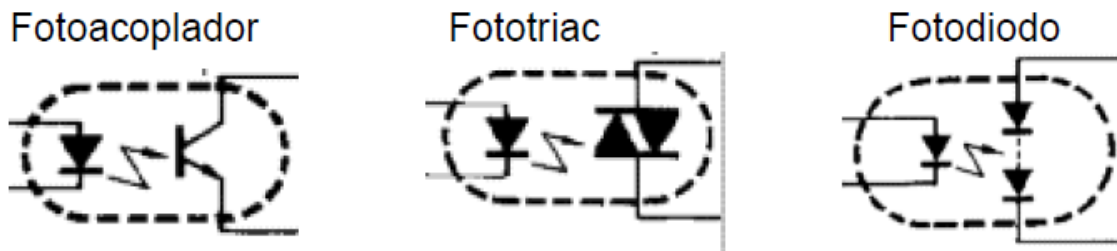


Fig. 3.95 Símbolos, Fotoacoplador, Fototriac, Fotodiodo.

- **Detector pasó por cero** (En algunos modelos): Un relé de estado sólido con función de paso por cero opera cuando la tensión de la carga (tensión alterna) se acerca o alcanza el punto cero. Los relés con esta función tienen una buena inmunidad a los parásitos de entrada y producen unas bajas radiaciones parásitas al conmutar tensiones bajas.

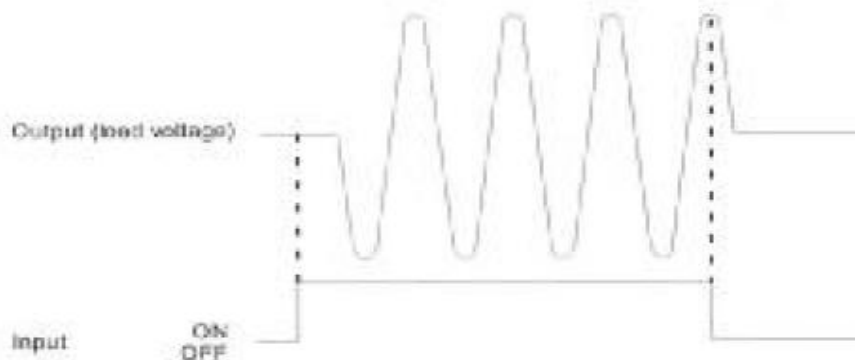


Fig.3.96 Característica de entrada y salida de un relé de estado sólido.

Los relés de estado sólido con la función de detección de paso por cero son adecuados para cargas resistivas, capacitivas y cargas inductivas con un factor de potencia entre 0.7 y 1

- Circuito de salida, Salida CA con tiristores antiparalelos o triacs, salida CC con transistor bipolar o MOS FET, salida CA-CC con transistor MOS FET (ya que tiene igual ganancia en directo que en inverso)
- Protección frente a transitorios, (En algunos modelos): Los más frecuentemente utilizados son redes RC, diodos, etc.



	Ventajas	Inconvenientes
Relés de estado sólido	<ul style="list-style-type: none">• Conexión con o sin función de paso por cero• Desconexión a $I=0$• Gran resistencia a choques y vibraciones• No ocasionan arcos ni rebotes al no existir partes móviles.• Vida de trabajo óptima• Frecuencia de conmutación elevada• Facilidad de mantenimiento• Funcionamiento silencioso• Control a baja tensión, compatible TTL/CMOS	<ul style="list-style-type: none">• Circuito de entrada muy sensible a perturbaciones• Necesidad de elementos de protección externos• Disipadores de calor• Redes de protección• Muy sensibles a la temperatura y a las sobretensiones• Tecnológica y conceptualmente más complejos y abstractos
Relés electromagnéticos	<ul style="list-style-type: none">• Económicos en consumo• Reducción de dimensiones en aplicaciones de conmutación a baja potencia• Gran diversidad en encapsulados• Gran número de contactos• Control indistinto CA/CC• Tecnológica y conceptualmente muy evidentes• Defectos conocidos, así como sus soluciones	<ul style="list-style-type: none">• Ruido• Dimensiones considerables en aplicaciones de control de potencia• Presencia de chispas, arco y rebotes• Más lento en la maniobra• Vida útil menor

Tabla 25 ventajas y desventajas relés de estado sólido vs relés electromagnéticos.



En la evolución de los componentes convencionales el mayor cambio que se puede esperar es la sustitución gradual de los relés y los contactores electromagnéticos convencionales por los de estado sólido (el contactor de estado sólido es un desarrollo paralelo al del arrancador estático ya que su parte de potencia es semejante).

Uso correcto

- Es necesario tomar una serie de precauciones antes de utilizar un relé de estado sólido:
- No aplicar una tensión o corriente excesiva en los circuitos de entrada y salida del SSR.
- Asegurarse que los tornillos de conexión están correctamente apretados
- Permitir una correcta ventilación del SSR, en el caso de que el SSR esté montado en un panel de control donde la ventilación no sea suficiente se deberá instalar un sistema de ventilación.
- Cuando se instale el SSR directamente en un panel de control, de manera que el panel es usado de disipador, el panel debe ser de un material con una baja resistencia térmica como aluminio o acero

3.4.2 Protección de ssrs.

Los relés de estado sólido son bastante sensibles a las perturbaciones y transitorios eléctricos, así como a las sobrecargas en tensión y en corriente.

El origen de los fenómenos transitorios puede ser:

- Electromagnético radiado
- Eléctrico conducido por los hilos de la red de alimentación

PARA PREVENIR ESTOS FENÓMENOS ES PRIMORDIAL DIMENSIONAR CORRECTAMENTE EL SSR CON RELACIÓN A SU APLICACIÓN, PARA EXPLOTAR ASÍ EL CONJUNTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SSR CON UN MARGEN DE SEGURIDAD SUFICIENTE.

Para escoger un relé de estado sólido es necesario tener en cuenta los siguientes factores:

- Especificaciones de tensión y corriente de la entrada
- El tipo de carga a conectar
- La corriente y la tensión de la carga
- La temperatura ambiente de funcionamiento, vibraciones.
- Encapsulado
- Tipo de conexión eléctrica (Terminales de tornillo, patillas para el soldado directo de los hilos, etc)
- Homologaciones
- Otras especificaciones como la rigidez dieléctrica, fiabilidad (tiempo medio entre fallos), etc



Diferentes tipos de cargas

Cuando se produce una conmutación de OFF a ON se producen picos en la corriente que pueden destruir los dispositivos semiconductores de potencia de los SSR.

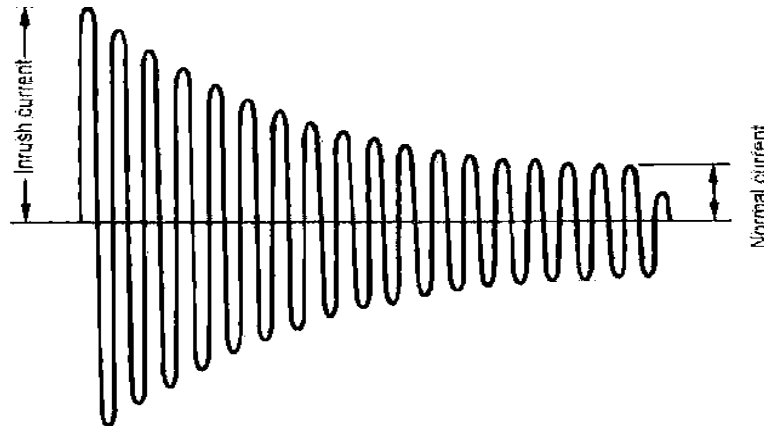


Fig.3.97 El valor del pico de corriente en la conmutación depende del tipo de carga.

Carga resistiva

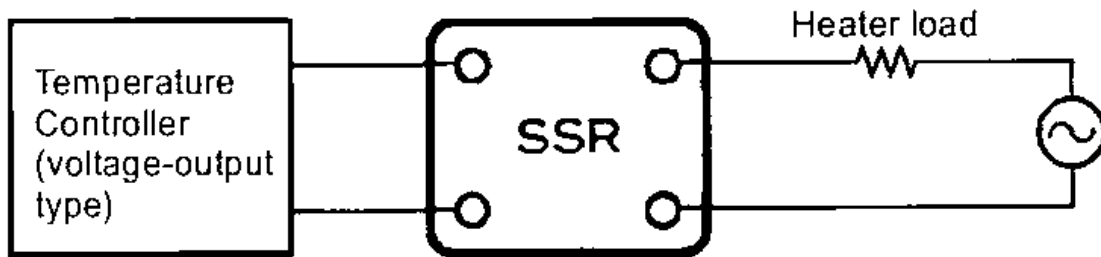


Fig. 3.98. En este caso la corriente y la tensión están en fase de manera que no hay problemas en el funcionamiento del SSR. Una típica carga resistiva es un calentador que se suele combinar con un controlador de temperatura con salida en tensión.

Lámparas incandescentes

La relación entre el pico de corriente en la conmutación y la corriente nominal es de 10 a 15 veces. Se debe seleccionar un SSR cuya resistencia a picos de corriente sea el doble que el valor máximo del pico de corriente en el transitorio. Utilizar un fusible en serie con la lámpara para proteger al relé en el encendido de la lámpara y en el caso de producirse un cortocircuito como consecuencia de la rotura del filamento. Al ser una carga inductiva aparece un desfase entre la tensión y la corriente y se utiliza un filtro RC (Se explica en la sección de protección en la salida) para mejorar el funcionamiento.

Motores

Cuando un motor arranca la corriente es de 5 a 10 veces mayor que la corriente nominal.

Se debe seleccionar un SSR cuya resistencia a picos de corriente sea el doble que el máximo valor de la corriente en el arranque. Al ser una carga inductiva aparece un desfase entre la tensión y la corriente y se utiliza un filtro RC (Se



explica en la sección de protección en la salida) para mejorar el funcionamiento.

Transistor

Cuando el SSR conmuta a ON la corriente que pasa por el SSR es de 10 a 20 veces la corriente nominal durante un tiempo de 10 a 500ms Se debe seleccionar un SSR cuya resistencia a picos de corriente sea el doble que el máximo valor del pico de corriente.

Rectificador de media onda

En este caso cuando se utiliza un SSR con función de paso por cero el relé no conmutará a ON, hay dos posibles soluciones:

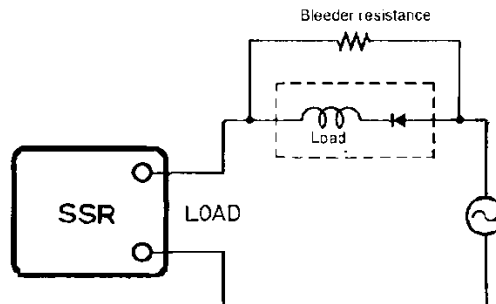


Fig. 3.99 Conectar una resistencia de absorción, que absorba un 20% de la corriente en la carga aproximadamente.

1.- Utilizar un SSR sin función de paso por cero

2.- Rectificador de onda completa

La corriente en la carga tendrá una forma rectangular como la que se muestra a continuación.

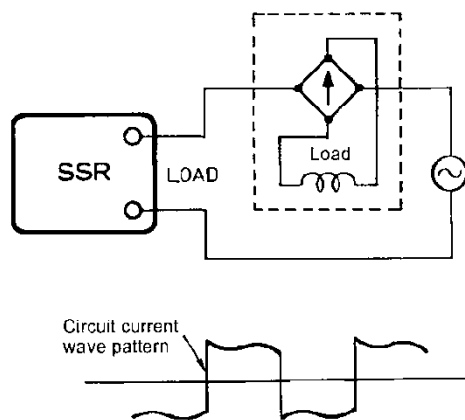


Fig.3.100 En este caso se deberá utilizar relés del modelo -V (G3F-203SL-V, G3H-203SL-V) o relés que tengan en su salida transistores MOS FET (G3DZ, G3RZ, G3FM).



Microcargas

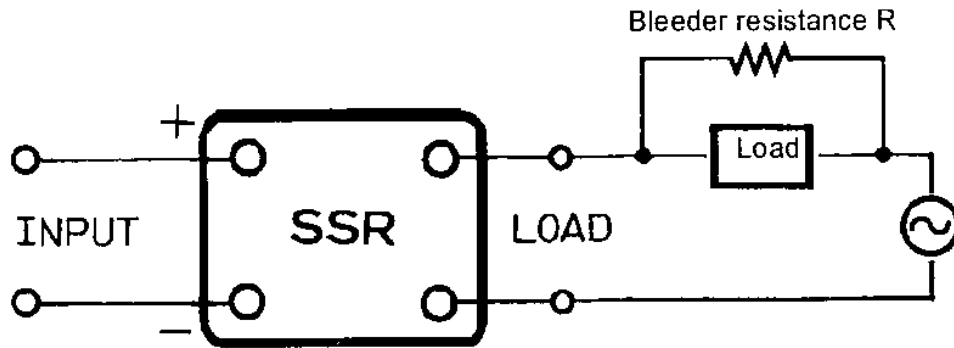


Fig. 3.101. Si la corriente de fuga es muy grande se puede producir un funcionamiento incorrecto, para evitar esto utilizar una resistencia de absorción en paralelo con la carga.

Los valores estándar de la resistencia de absorción son:

- Para una fuente de alimentación de 100VAC de 5 a 10k Ohmios, 3W
- Para una fuente de alimentación de 200VAC de 5 a 10k Ohmios, 15W

Transformador

No utilizar una fuente de alimentación controlada por un transformador como fuente de alimentación de la carga debido a que un transformador es un caso extremo y particular de las cargas inductivas saturables con magnetización residual remanente y se pueden producir fallos en el funcionamiento, ya que la corriente puede llegar a ser de 10 a 100 veces la corriente nominal.

Cargas capacitivas

Se consideran cargas capacitivas las líneas largas de transmisión, filtros y fuentes de alimentación. La intensidad en la carga inicialmente puede llegar a ser de 20 a 50 veces la intensidad nominal, ya que un condensador inicialmente se comporta como un cortocircuito y la intensidad es limitada por el valor de la resistencia (Añadir una resistencia en serie). Cuando el estado del relé sea OFF tendrá aplicada a su salida la tensión de alimentación más la tensión de carga del condensador, de manera que se debe seleccionar un SSR con una tensión de salida que sea el doble de la de alimentación. Se debe seleccionar un SSR (con función de paso por cero) cuya resistencia a picos de corriente sea el doble que el máximo valor de la corriente inicial.

Fluorescentes y lámparas de vapor de mercurio

Hay que tener en cuenta que en este tipo de carga la corriente en la conexión suele ser de 3 veces superior a la de funcionamiento normal, pero su presencia tiene una duración mayor, en el caso de los fluorescentes es de 10 segundos y hasta 5 minutos en el caso de las lámparas de vapor de mercurio.

:

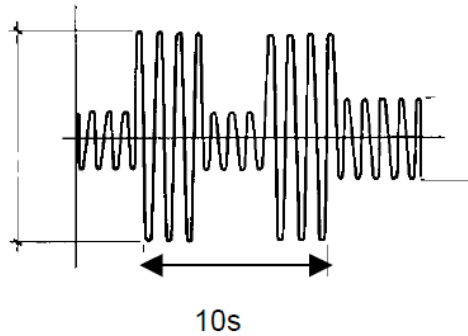


Fig. 3.102 La forma de la corriente en la conexión de una lámpara fluorescente.

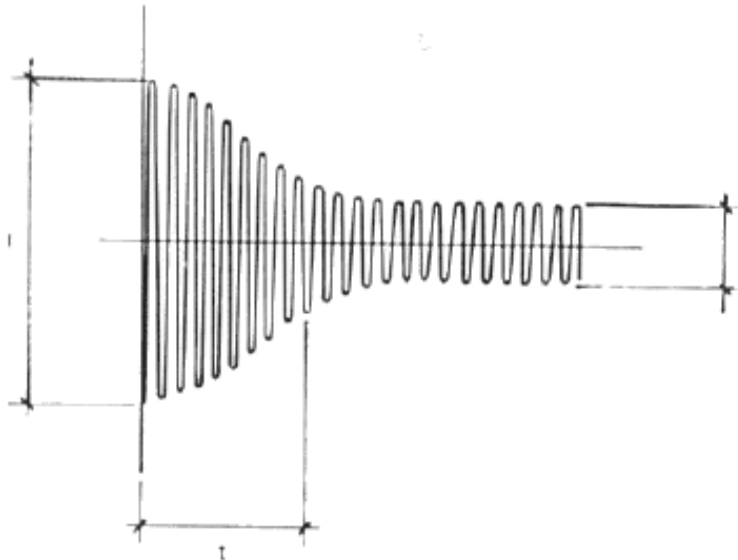


Fig.3.103 Y la forma de la corriente en la conexión de una lámpara de gas de mercurio será:
3 a 5 minutos

A la hora de seleccionar el SSR que se va a utilizar se deberá tener en cuenta el pico de corriente y la duración de este pico.

Cargas de alta impedancia

Cuando se tenga una carga de alta impedancia la corriente de fuga del relé produce una tensión muy elevada entre los extremos de la carga en el estado de desconexión. Para solucionarlo se suelen instalar cargas de alta impedancia en paralelo con la carga (lámparas de baja potencia).

Relé temporizador neumático

Un relé con temporización neumática puede estar constituido por diferentes contactos, dependiendo del tipo y del fabricante: contactos NANC o NA + NC, contactos instantáneos

NA o NC, etc. La regulación del tiempo puede ajustarse por medio de un tornillo que lleva en el frontal (Fig. 3.104).

En este sistema, la temporización se obtiene por corriente de aire que recorre un surco de longitud regulable. El aire se recicla y se filtra, permitiendo con ello que el funcionamiento no se vea afectado por poluciones ambientales.

Al igual que en los anteriores tipos, existen relés neumáticos temporizados a la



conexión y temporizados al reposo.

Principio de funcionamiento de un relé neumático temporizado al reposo de la casa Telemecanique:

1. Se activa el relé. Al cerrarse, el circuito magnético comprime el resorte A y la membrana. El aire de la cámara B se expulsa a la cámara C por el orificio D, que se abre brevemente. El contacto bascula instantáneamente.
2. Comienza a contar el tiempo. Al abrirse el circuito magnético de control, el resorte A repele la membrana y crea una depresión en la cámara B. El aire de la cámara C vuelve a la cámara B a través de un filtro de metal sintetizado. Su velocidad se regula mediante un surco de longitud variable practicado entre dos discos. La temporización es el resultado de la variación de posición relativa de los dos discos que se obtiene por medio del tornillo de regulación.
3. Fin de la temporización. Al finalizar el tiempo regulado, el contacto bascula y vuelve a su posición inicial. Los temporizadores neumáticos no están indicados para maniobras cuyo ciclo de repetición sea muy breve o frecuente.

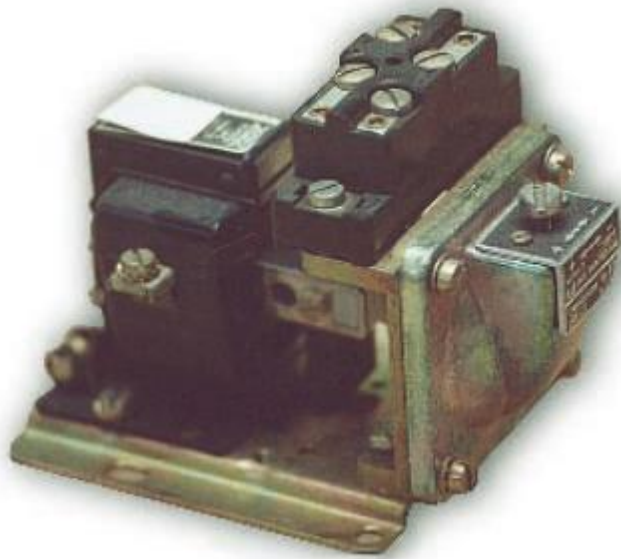


Fig.3.104 temporizador de tipo neumático.

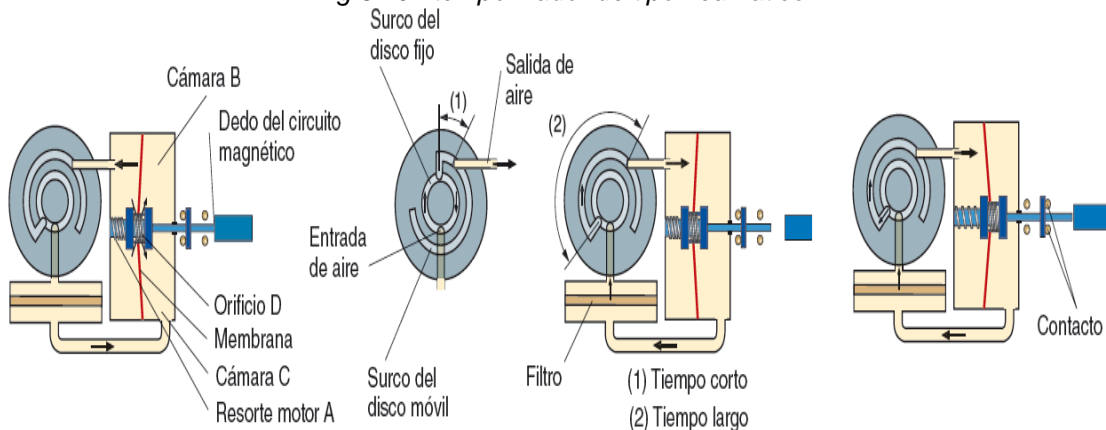


Fig.3.105 esquema de funcionamiento de un relé neumático temporizado al reposo de la casa Telemecanique.



CAPÍTULO 4 ARRANCADORES MAGNÉTICOS.

4.1.1 El arrancador magnético.

Su función principal es controlar un motor eléctrico en arranque como en parada del motor así como su protección del mismo como del operador de la maquinaria, sus partes principales son contactos (M) de fuerza, contacto auxiliar (M) de retención, bobina del arrancador.

LAS PROTECCIONES TERMICAS (BIMETALICAS): Las protecciones se adhieren al arrancador magnético estas no vienen con el arrancador se tienen que conseguir aparte.

Es decir el arrancador es un interruptor que por medio de su bobina cierra los contactos (M).

Cuando la energía circula por la bobina eléctrica posee un núcleo de hierro que este se magnetiza y en los contactos (M) también tiene un núcleo de hierro logrando la atracción por medio de electromagnetismo y cerrando uniendo los contactos (M) para así dejar pasar la energía eléctrica por sus contactos (M) logrando la activación del motor eléctrico.

Los arrancadores magnéticos se dividen en 2 categorías principalmente:

- Arrancadores manuales.
- Arrancadores automáticos.

4.1.2 Arrancadores manuales de cc y ca.

Generalidades.

Un arrancador eléctrico se define como un regulador cuya función principal es la de poner en marcha y acelerar un motor.

El término manual asocia la mano de un ser humano(o su equivalente) en combinación con su arrancador eléctrico. Lleva consigo dos argumentos:

- Que el ser humano posee inteligencia.
- Que esta inteligencia se aplica con el objeto de hacer funcionar un arrancador manual para que un motor pueda ser puesto en marcha adecuadamente y acelerado bajo diferentes condiciones de carga para alcanzar su velocidad nominal.

En un dispositivo automático es casi imposible incluir la versatilidad equivalente a la que posee un operario. El sentido del tacto, vista, olfato y oído, y la experiencia, adecuadamente aplicados, pueden conducir a la prolongación de la vida del motor en condiciones adversas de arranque y de marcha. Aunque existen diferentes ventajas para el arranque automático, no puede negarse la infinita superioridad de un adecuado control manual.



4.1.3 Puesta en marcha y aceleración de motores de cc.

La figura 4.1 muestra en forma esquemática, la resistencia en serie con el circuito del inducido que se precisa para la aceleración de motores serie, shunt, o derivación y compound o compuesto, respectivamente, con un dispositivo de arranque manual para eliminar la resistencia en serie del inducido en seis etapas. Se observara que los motores shunt y compound suelen ponerse en marcha con las corriente de plena excitación, es decir, la resistencia del reóstato regulador del campo es nula, y el motor serie se pone en marcha siempre bajo carga.

En el instante en que se aplica una tensión, V_a , en bornes del inducido para hacer que gire el motor, el inducido del motor no produce ninguna f.c.e.m. Ya que la velocidad es nula. Los únicos factores que limitan la corriente son la c.d.t. en las escobillas y a resistencia del circuito del inducido, R_a . Como ninguno de ellos, bajo condiciones normales sobrepasa el 10 o el 15 por ciento de la tensión aplicada en los bordes del inducido, V_a , la sobre carga llega a muchas veces la corriente del inducido.

Se requiere un valor progresivo decreciente de la resistencia de arranque, cuando el motor origina una f.c.e.m. como resultado de la aceleración. Este es el principio del arrancador de resistencia del inducido.

La forma en que funciona un arrancador en combinación con los tres tipos básicos de dinamos de c.c, utilizadas como motores, se muestra en la figura 4.1.

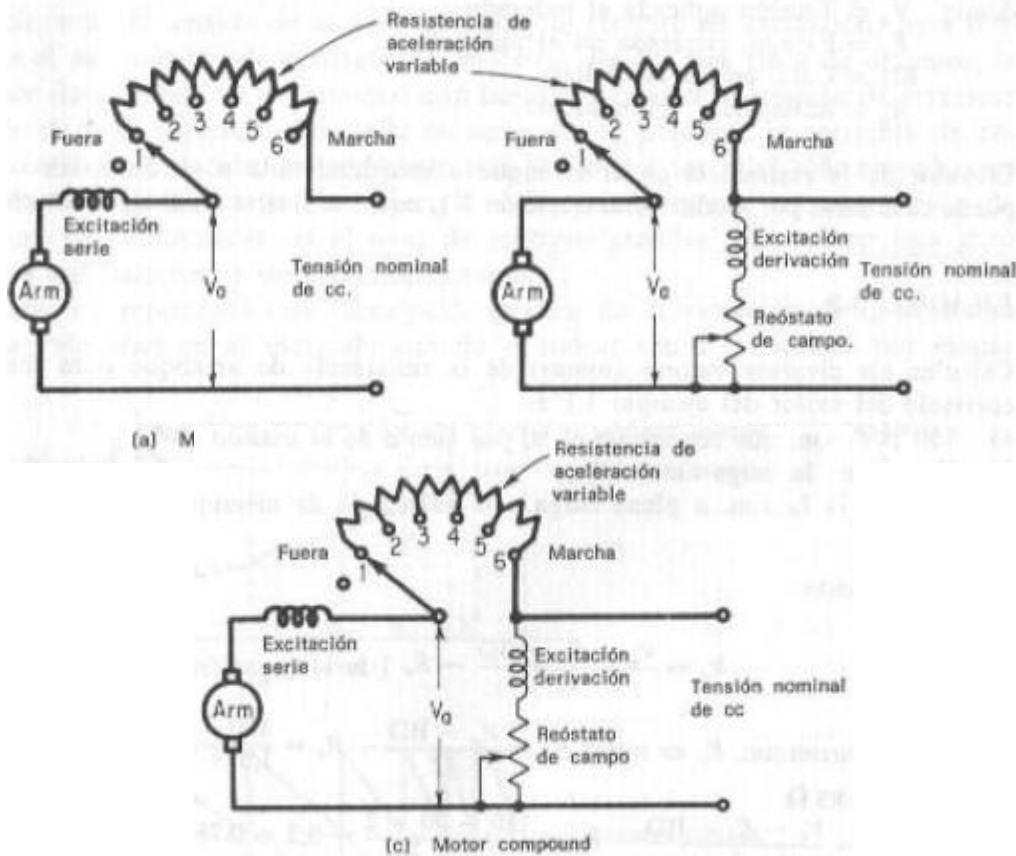


Fig. 4.1 Esquemas que indican como la resistencia de inducido de aceleración se conecta y se regula en el circuito del inducido para acelerar motores serie, shunt y compound.



Los motores shunt y compound se ponen en marcha con excitación en pleno campo (es decir toda la tensión de la línea se aplica al circuito de excitación). para desarrollar el par máximo de arranque ($T = K\phi I_a$). En los tres tipos de dinamos la corriente de inducido en el arranque está limitada por una resistencia de arranque variable en gran potencia conectada en serie. En la práctica, la corriente de entrada inicial del inducido, generalmente está limitada a un valor ma elevado que la corriente a plena carga (véase fig. 4.2), para originar un mayor par de arranque, particularmente en el caso de motores grandes que poseen un gran inercia y que adquieren velocidad lentamente.

La figura 4.2 representa una descripción grafica de la variación de la corriente y la velocidad en el inducido cuando el motor shunt se acelera por etapas

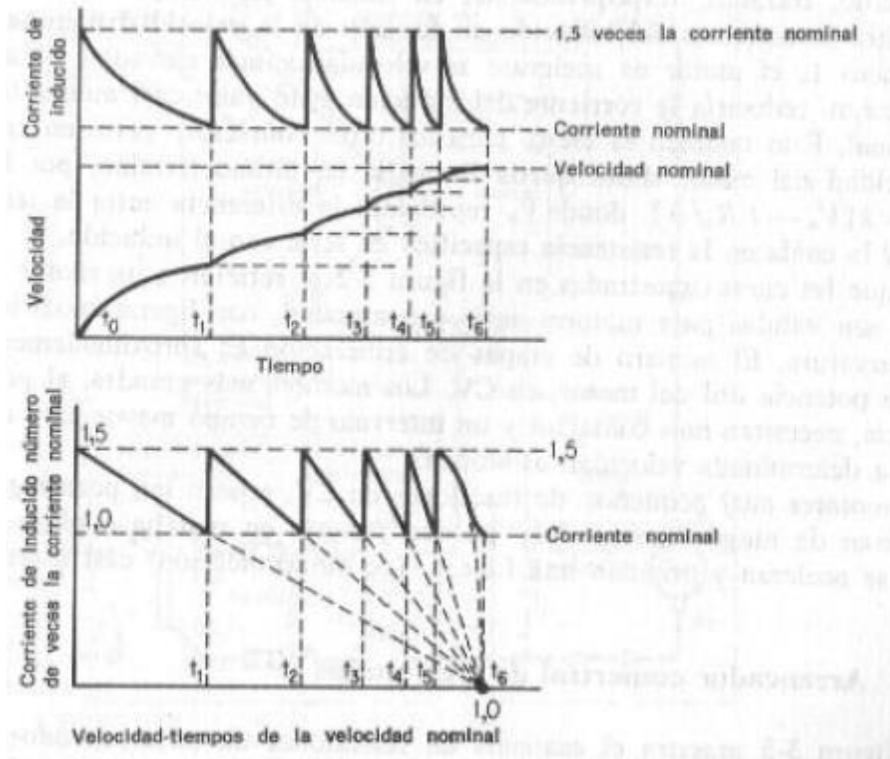


Fig.4.2 Aceleración de un motor shunt.

Hasta su velocidad nominal. Se observa que, debido a que el motor se pone en marcha desde el reposo y a causa de que su inducido posee inercia, el primer contacto de aceleración:

1. Necesita el mayor espacio de tiempo antes que la aceleración se haga casi nula y de que la velocidad se aproxime a la determinada en un principio, a causa de, la reducida tensión en el inducido.
2. La carga aplicada al motor.
3. El flujo de excitación.
4. La f.c.e.m ($S = K[V_a - I_a R_a] \phi$).

Avanzando la maniobra a la segunda posición (punto 2), se reduce la resistencia y suministra una corriente interruptiva de 150 por ciento de la carga nominal desarrollando un aumento del par para acelerar el motor a



la velocidad asintótica más elevada determinada por la nueva tensión en el inducido).

A la vez que la resistencia del inducido se reduce en cada toma, el motor se acelera pero necesita menos tiempo para poder alcanzar su velocidad asintótica (aceleración nula) y reducir la corriente hasta aproximadamente la carga nominal. Sin embargo, el último contacto puede necesitar algo más de tiempo que los intermedios debido al aumento de carga y de velocidad, como se muestra en la figura 4.2.

Las 2 curvas superiores de la figura 4.2 muestran la corriente y la velocidad del inducido, trazadas, respectivamente, en función del tiempo. La curva inferior muestra la corriente del inducido en función de la velocidad nominal. Si en el contacto 1, el motor se acelerase a velocidades más elevadas, el aumento de la f.c.e.m reduciría la corriente del inducido a un valor casi nulo a la velocidad nominal. Esto también es cierto para los otros contactos; pero, en cada uno, la velocidad del motor shunt queda limitada, en último término, por la ecuación; $(S = K[V_a - I_a R_a] \phi)$, donde V_a representa la diferencia entre la tensión de la red y la caída en la resistencia específica en serie con el inducido. Aunque las curvas mostradas en la fig 4.2 se refieren a un motor shunt, también son válidas para motores serie y compound, con ligeras modificaciones en la curvatura. El número de etapas de aceleración es aproximadamente función de la potencia útil del motor, en CV. Los motores más grandes, al poseer mayor inercia, necesitan más contactos y un intervalo de tiempo mayor para aproximarse a una determinada velocidad asintótica.

Los motores muy pequeño, de fracciones de CV, poseen tan poca inercia que no precisan de ningún arrancador; pueden ponerse en marcha a plena tensión, ya que se aceleran y originan una f.c.e.m (de autoprotección) casi inmediatamente.

4.1.4 Arrancador comercial de tres bornes.

La figura 4.3 muestra el esquema de conexiones de un arrancador manual de tres tomas de corriente que se utiliza para la puesta en marcha de un motor shunt. La figura agrupa cuatro unidades separadas y un equipo distinto:

1. El arrancador de tres tomas.
2. Una caja de interruptores de seguridad con interruptor de protección de cortocircuitos y sobrecargas.
3. Motor shunt, con sus circuitos de inducido y de excitación.
4. Un reóstato de campo exterior.

El funcionamiento es el mismo que el descrito anteriormente. Obsérvese que en el punto 1 del arrancador de la figura 4.3, la tensión de plena



excitación se aplica al campo a través de una bobina de retención. Cuando el brazo de arranque llega al último contacto (punto 6), la corriente en el circuito de excitación (a través de la pequeña resistencia de arranque, de la bobina de retención, del reóstato de campo, y del devanado de excitación) produce la suficiente f.m.m en la bobina de retención, para mantener la armadura del electroimán de hierro dulce del brazo de arranque atraída magnéticamente en esta posición venciendo la tensión en sentido contrario del resorte sirven para proporcionar:

- Protección contra acampo abierto o debilitado.
- Protección de mínima tensión.

En el caso de una situación cualquiera de ambas la tensión del resorte antagonista (que normalmente se puede ajustar), es suficiente para desenganchar el brazo de arranque devolverlo a su posición de fuera. El arrancador de tres bornes puede utilizarse también en un motor compound; la conexión serie de la excitación puede hacerse en los puntos $X_1 - X_2$ del motor, como se muestra en la figura 4.3.

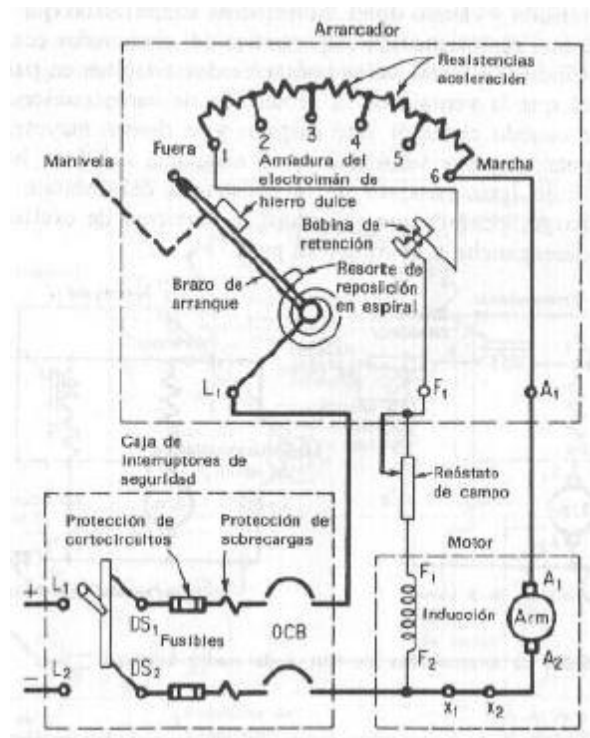


Fig.4.3 arrancador manual de tres bornes para un motor shunt.

El motor puede detenerse por cualquiera de las siguientes circunstancias:

- La apertura del interruptor de la línea principal DPST.
- Un cortocircuito (el fusible principal que abre el circuito), en el circuito del inducido o de excitación, incluyendo el arrancador.



- Una sobrecarga en el circuito del inducido haciendo funcionar los disyuntores de sobrecarga OCB_s .
- Un circuito de campo débil o abierto.
- Una disminución de la tensión de la línea.

Como se muestra en la figura 4.3, el objeto principal, de la bobina de retención es el de mantener el motor conectado a la re, y a la vez proporcionar protección de mínima tensión y campo débil. El esquema simplificado que se muestra en la figura 4.4a, es una representación esquemática del arrancador comercial de tres bornes: como se indica, el arrancador consta de dos circuitos en paralelo. Previamente se señalara que la ventaja de la protección de campo abierto se es inconveniente cuando el motor está cargado y se deseen mayores velocidades. Para poder obtener mayores velocidades, es necesario debilitar la corriente de excitación y el flujo (por aumento de la resistencia del reóstato regulador del campo). Sin embargo siempre que se reduce la corriente de excitación, el brazo de arranque se desengancha y el motor se para.

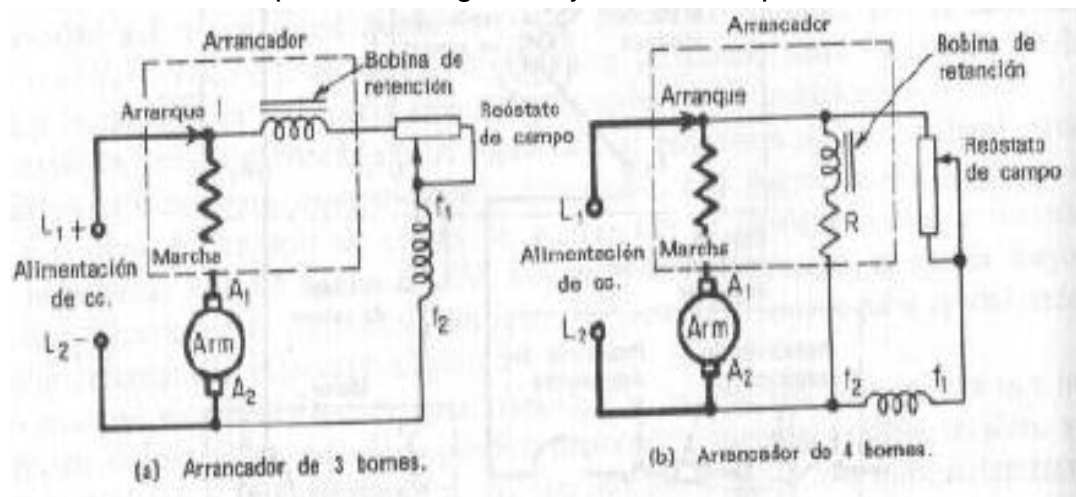


Fig.4.4 esquemas simplificados de arrancadores de tres y de cuatro bornes.

Frecuentes e inesperadas paradas de esta índole en el funcionamiento, condujeron al arrancador de cuatro bornes mostrado en la forma esquemática en la figura 4.4b. El arrancador de cuatro bornes se diferencia del el de tres en que la disposición de cuatro tomas habilita tres vías en paralelo en bornes de la fuente de alimentación en vez de dos. La vía adicional en paralelo está formada por el circuito separado de la bobina de retención, en serie con una resistencia de protección R. la resistencia puede ser el tipo de tomas o semivariable para equilibrar la tensión del resorte de reposición en espiral.

4.1.5 Arrancador comercial de cuatro bornes.

El arrancador comercial de cuatro tomas de corriente, en el que se necesita una cuarta terminal para el circuito de la bobina de retención, mostrada en las figuras 4.5 y 4.4b, permite variar la corriente en el circuito de la bobina de retención. Claro



está que ello representa la ventaja más grande del arrancador de cuatro bornes, pero esta ventaja contribuye a tres inconvenientes:

1. Si el campo se debilita considerablemente o queda abierto accidentalmente, el motor se embalara a velocidades peligrosas; contra el exceso de velocidad, en la industria suelen usarse dispositivos de protección auxiliares, tales como circuitos centrífugos.
2. Para poder aumentar la velocidad cuando el motor acciona una carga fuerte, la corriente de excitación queda debilitada; si el motor vuelve a arrancar entonces, hace que la carga se acelere demasiado rápida y peligrosamente (la corriente del inducido se incrementa para compensar el flujo de excitación debilitado de acuerdo con la teoría de la dinamo de doble excitación).
3. El aumento de la corriente de inducido puede continuar llegando a disparar los dispositivos de protección de sobrecarga, e incluso de cortocircuito, hasta que se haya reducido la resistencia del reóstato de campo.

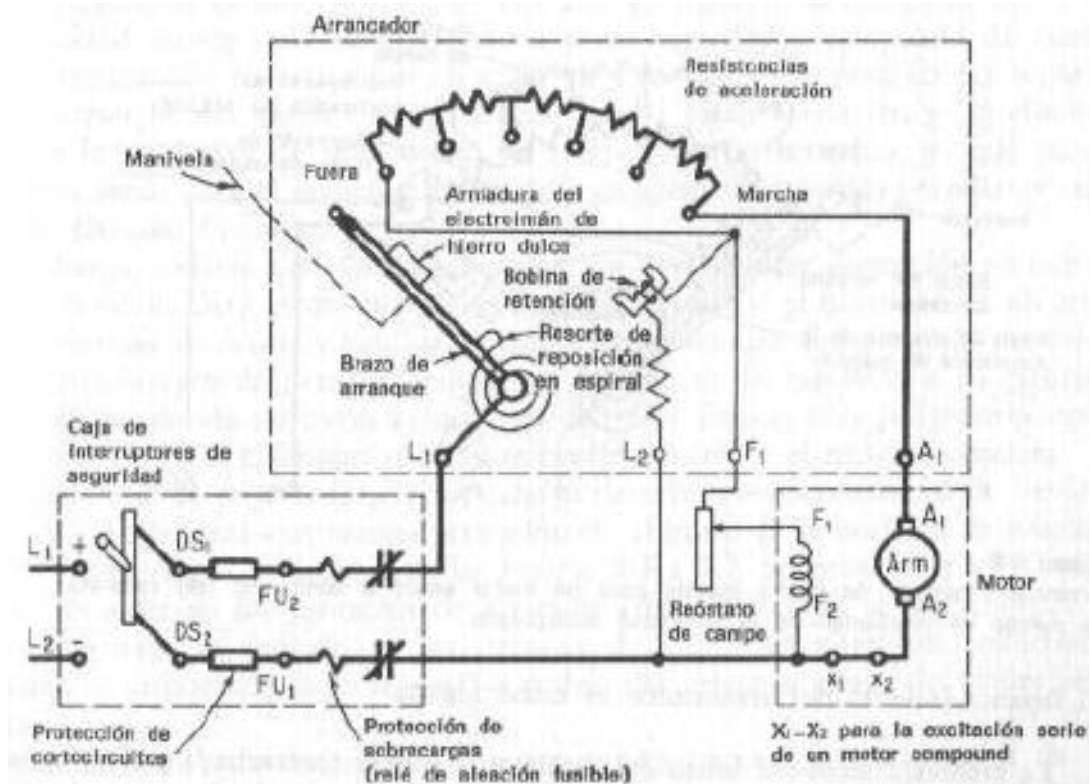


Fig.4.5 arrancador manual de cuatro bornes para un motor shunt o compound.

Los dos últimos inconvenientes se salvan incorporando una disposición de memoria automática en el interior del arrancador de cuatro bornes, como se muestra en la figura 4.6. El reóstato de campo va montado directamente en el arrancador, y la bobina de retención suelta el brazo de arranque (como resultado



de una baja tensión o de la apertura del interruptor de desconexión de la línea).este repone automáticamente la manivela del reóstato de campo a la posición de fuera.

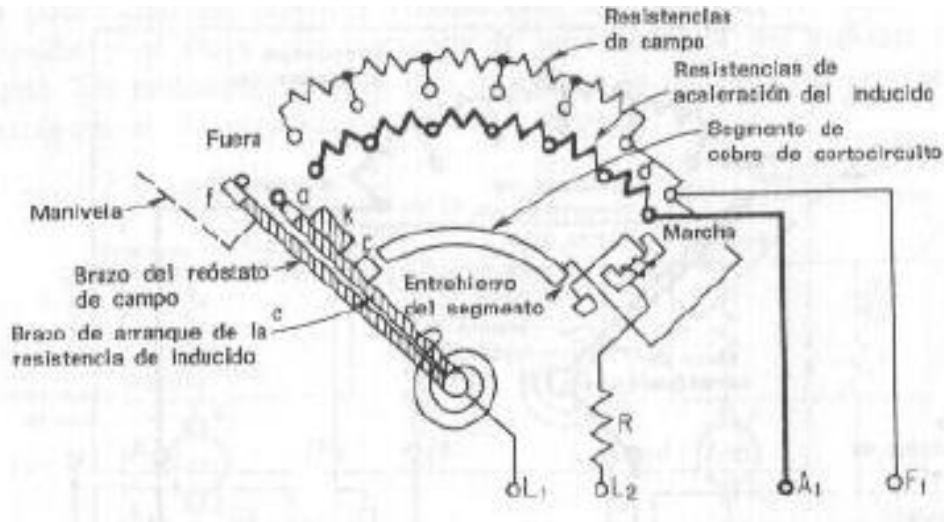


Fig.4.6 Arrancador manual de cuatro bornes para un motor shunt o compound con reóstato de regulación de la velocidad incorporado.

El funcionamiento del arrancador es como sigue:

1. La manivela mueve el brazo del reóstato campo (f) y el arranque de la resistencia del inducido ($contacto a$ y c) de la posición de fuera al contacto de la primera resistencia del inducido; en esta posición, toda la resistencia del reóstato de campo esta shuntada por el contacto c del inducido, conectado por medio de un segmento de cobre de cortocircuito al terminal (F_1), y el motor arranca a plena corriente de excitación.
2. El contacto a del brazo de arranque del inducido proporciona una resistencia de inducido máxima en el arranque.
3. La resistencia de arranque del inducido se reduce de manera normal hasta que se alcanza la última posición o de marcha, salvando el entre hierro del segmento de cobre de cortocircuito. En la posición de marcha solo queda retenido el brazo de la resistencia de inducido por su armadura, k , y por la bobina de retención; el brazo de la resistencia de campo es libre de moverse por medio de la manivela.
4. Por tanto, la manivela sirve para poner en marcha el motor y controlar el ajuste de la resistencia del reóstato de campo situando el contacto f del brazo en posición correspondiente al incremento de velocidad deseado por encima de la básica (corriente a plena excitación).
5. En el caso de la baja tensión o de la apertura del interruptor de desconexión de la línea, el brazo de la resistencia de arranque del inducido es desenganchado por la bobina de retención, volviendo de nuevo los dos brazos a la posición de fuera.



El arrancador de cuatro bornes (fig.4.6) con un reóstato de campo de ajuste o la velocidad incorporando (denominado a veces arrancador compound de cuatro bornes o regulador manual de la velocidad de cuatro bornes) presenta ventajas:

1. Arranque del motor siempre a corriente de plena excitación.
2. Eliminación de la necesidad de un reóstato de campo externo separado, ya que puede utilizarse tanto para el arranque como para el ajuste de la velocidad mediante control de reóstato de campo.

Sin embargo todavía tiene el inconveniente de no presentar protección de campo abierto o débil. Otro inconveniente es que, debido a que el brazo no puede estar en su posición de marcha habitual, siempre en el sentido de la agujas del reloj existe la tentación de parar el motor por retorno de la manivela a su posición de fuera en sentido contrario de las manecillas del reloj. Esto es muy peligroso porque durante el proceso, el campo se debilita continuamente y el motor se acelera. Ninguna clase de arrancador, incluyendo el descrito anteriormente, debe llevarse a la posición de paro (retirado) manualmente el brazo de su posición de marcha. En los arrancadores mostrados en las figuras 4.3 a 4.7, tal proceder podría originar el desgaste de los contactos de arranque, cuando se interrumpen la fuerte corriente de inducido y los circuitos de excitación altamente inductiva. Además, el arrancador de la figura 3-6 podría dar origen a altas velocidades peligrosas.

La manera adecuada de parar un motor es desconectar sus terminales de línea $L_1 - L_2$, de la fuente de suministro, utilizando un interruptor de desconexión. El brazo será devuelto automáticamente a su posición de fuera.

4.1.6 Arrancadores manuales de motor serie.

Un motor serie es fundamentalmente, un circuito de dos terminales o de dos tomas. Los arrancadores comerciales de tres y de cuatro bornes anteriormente descritos se utilizan en motores shunt y compound, indistintamente, para la misma corriente de arranque o la misma potencia nominal.

Se necesitan modificaciones especiales para los arrancadores de un motor serie. La figura 4.7a, muestra un arrancador manual de dos bornes de un motor serie el que la bobina de retención (de unas cuantas vueltas de hilo grueso) va conectada en serie con la excitación serie y el inducido. Durante el periodo de arranque de marcha, un motor serie cargado tendrá la corriente de inducido suficiente para excitar la bobina de retención lo necesario para retener el brazo del arrancador en posición de marcha. En el caso de anulación de la carga o reducción de la misma hasta el punto en que se desarrolle peligrosamente una elevada velocidad, la reducción de la corriente de inducido es suficiente para debilitar la bobina de retención y soltar el brazo de arranque.

Las dos ventajas del arrancador manual de dos bornes, de disparo en vacío, de un motor serie son:

1. Protección contra el exceso de velocidad en el caso de eliminación o reducción de la carga.
2. Protección de mínima tensión.



En aplicaciones que implican el control de velocidad, donde la carga esta acoplada al motor de tal forma que no puede ser eliminada (como en el servicio de tracción de ferrocarriles por ejemplo). La carga del motor puede reducirse (a altas velocidades) lo suficiente para desconectar el motor, utilizando el arrancador del tipo de disparo en vacío. El arrancador de la figura 4.7b, el arrancador manual en serie de disparo a mínima tensión de tres bornes se utiliza donde no existe la posibilidad de embalamiento accidental debido a una pérdida de carga. Este arrancador es al motor serie lo que el arrancador de cuatro tomas lo es a los motores shunt y compound. Se disponen de tres terminales L_1, L_2 y S_1 . Ello proporciona solo la protección de mínima tensión y no protege al motor en el caso de campo débil. Generalmente, se emplean junto a dicho arrancador los dispositivos de protección centrífugos contra el exceso de velocidad. Una resistencia variable de protección, R , se conecta en serie con la bobina de retención para ajustar el disparo del brazo de arranque.

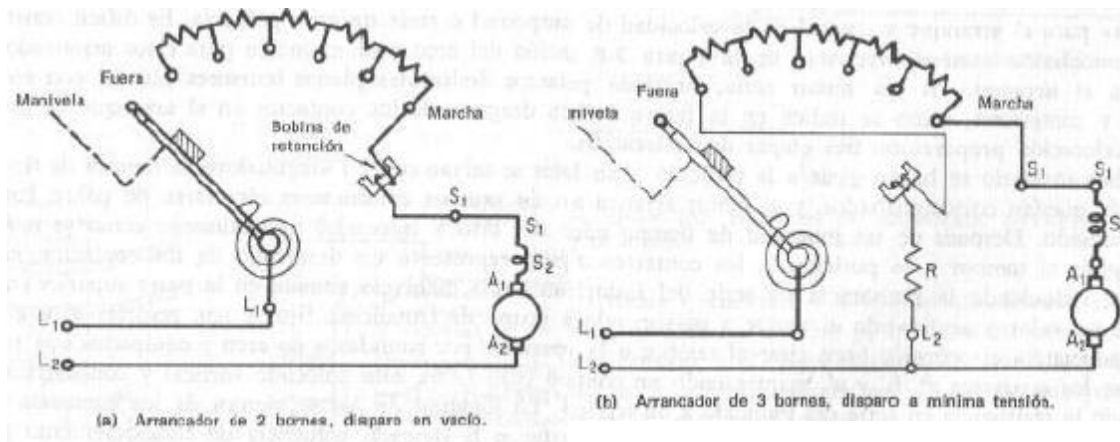


Fig.4.7 arrancadores manuales para un motor serie.

4.1.7 Regulador manual de tambor.

Todos los arrancadores manuales planos (de chapa frontal) descritos anteriormente poseen ciertos inconvenientes eléctricos y mecánicos cuando se utilizan en motores shunt, compound o serie de gran potencia. es difícil construir la protección contra la formación del arco y de extinción para estos arrancadores, y la naturaleza de los contactos deslizantes planos (cursores planos) con entrehierro entre ellos se traduce en desgaste de los contactos en el arranque de los motores más grandes.

Estos inconvenientes se salvan con un regulador de tambor tipo rotativo, que tiene un conjunto de gruesos conductores circulares de cobre laminados giratorios, aislados uno del otro y colocados verticalmente como se muestra en la figura 3-8a. la figura representa un desarrollo de los contactos, en 360° que se hacen girar mediante una manivela situada en la parte superior (que no aparece en la figura). Un grupo de frotadores fijos con resortes a' a g' mostrados en la figura 4.8b, separados por sumideros de arco y equipados con protección magnética de extinción, está colocado vertical y concéntricamente con los contactos móviles. La longitud de los segmentos de los contactos móviles puede variarse para ajustar a la deseada secuencia de funcionamiento prefijada y la precisión de los frotadores



fijos también puede ajustarse. Además esta construcción proporciona una gran flexibilidad en el gobierno de la potencia eléctrica de una forma prefijada para el arranque de un motor. El regulador sencillo de tambor inversible de la figura 4.8 se utiliza en esta aplicación para el arranque de un motor serie; también puede usarse para motores shunt y compound, como se indica en la figura 4.8b. Una resistencia en serie del inducido. Después de un intervalo de tiempo adecuado, cuando el operario hace girar el tambor a la posición 2, los contactos a' , b' y c' , quedan cortocircuitados, reduciendo la resistencia en serie del inducido a las dos terceras partes de su valor y acelerando el motor a mayor velocidad. Después de otro intervalo adecuado, el operario hace girar el tambor a la posición 3, donde se cortocircuitan los contactos d' , b' y a' , manteniendo un contacto directo de L_1 y a d' y reduciendo la resistencia en serie del inducido a un tercio de su valor total. Finalmente, después de un tercer intervalo adecuado, se hace girar el tambor a la posición 4 (marcha) donde quedan cortocircuitados los contactos a' , b' y e' , por lo que se cortocircuita toda la resistencia en serie y se coloca el motor serie a plena tensión. Se observará que existen dos grupos de segmentos comunes o en cortocircuito en el tambor giratorio. Los segmentos a a e y los f , g . El primer grupo sirve para disminuir la resistencia en serie del inducido progresivamente y conectar el motor a la red. El segundo grupo sirve para alimentar al relé contactor principal M y sus contactos principales y auxiliares de la figura 4.8b en la posición fuera. Por lo tanto, el relé m se autoalimenta en todas las posiciones a través de su contacto auxiliar m. cuando el tambor está en una de las posiciones de arranque o en la posición de marcha (posiciones de 1 a 4, respectivamente), el relé M:

- Servirá como protección de mínima tensión, ya que está en paralelo con el circuito del inducido a plena tensión.
- Hará volver el tambor a la posición de fuera para poner en marcha de nuevo el motor en caso de una parada del mismo por cualquiera de las siguientes causas.

El motor se parará bajo una de las siguientes condiciones:

1. Apertura del interruptor principal de la línea.
2. Una disminución de la tensión activa suficiente para desexcitar el relé M.
3. Una sobrecarga suficiente para hacer que disparen los contactos normalmente cerrados de los relés OL_1 y OL_2 .
4. Un cortocircuito bien en el circuito de relés de control, bien en el regulador de tambor, o en el circuito del motor, haciendo que los fusibles abran el circuito.
5. Una apertura en el circuito de campo shunt (de trazo fino) de un motor compound o shunt que utiliza este regulador.

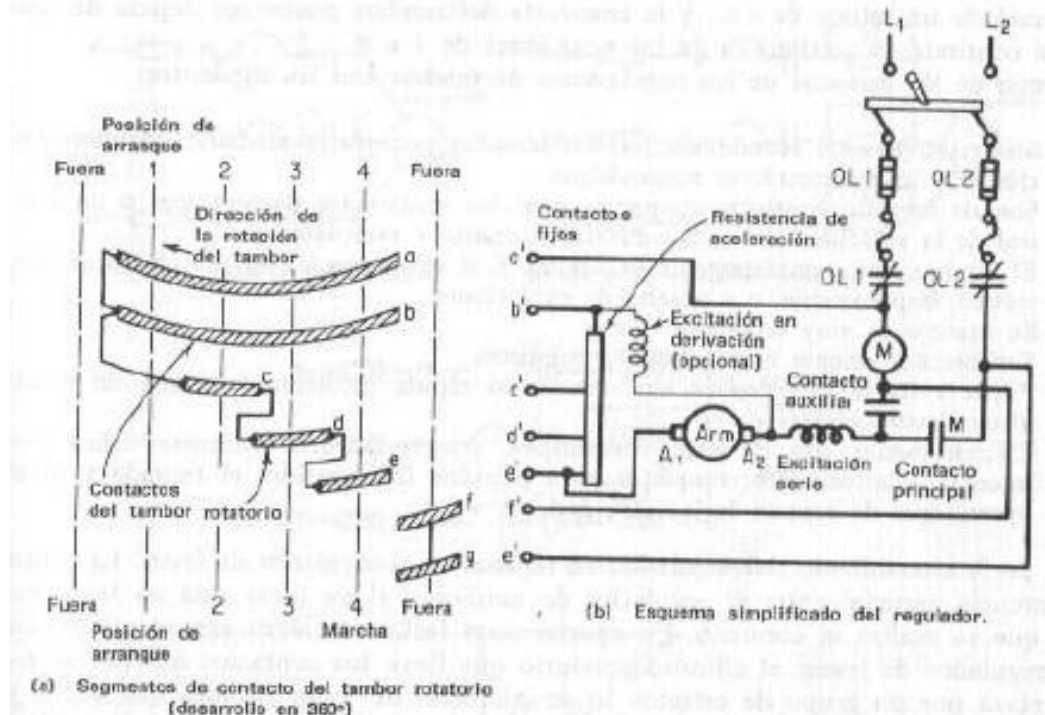


Fig.4.8 regulador manual de tambor (con protección de sobre cargas, y de mínima tensión) para el arranque de un motor serie.

Si la resistencia que se utiliza en serie con el inducido del motor es de variación continua en vez de intermitente, el regulador de tambor puede servir como medio de control de la velocidad por resistencia de inducido, así como de arrancador manual de un motor de c.c. y la manivela del tambor puede ser dejada de manera continua en cualquiera de las posiciones de 1 a 4. Algunas de las ventajas de los reguladores de tambor son las siguientes.

- Son relativamente económicos, en los tamaños pequeño y mediano, en comparación con los arrancadores automáticos.
- Son de formato bastante compacto, pero las resistencias de arranque o de control de la velocidad deben de ser colocadas aparte y externamente.
- El tambor está completamente protegido y, si es necesario, puede fabricarse hermético, impermeable, o a prueba de explosiones.
- Su manejo es muy sencillo.
- Son mecánicamente muy simples y robustos.
- Puede evitarse una aceleración demasiado rápida mediante inclusión de mecanismos retardadores.



- Eléctricamente, son de gran versatilidad, porque pueden realizarse conexiones internas relativamente complejas para permitir la inversión, el frenado y otras operaciones de control de velocidad.

Un perfeccionamiento del regulador de tambor es el regulador de levas. La única diferencia esencial entre el regulador de tambor y el de levas está en la forma en que se realiza el contacto. En apariencia y funcionamiento son idénticos. En el regulador de levas, el cilindro rotatorio que lleva los contactos móviles se reemplaza por un grupo de estratos (o cubiertas) de levas aisladas que abren y cierran los grupos de contactos fijos. El regulador de levas aventaja al de tambor en:

- Sus contactos son relativamente simples para la conservación y el reemplazamiento.
- Se pueden crear rápidamente nuevas secuencias de conexión por reemplazamiento de levas o puentes.
- Se pueden diseñar contactos fijos para la apertura y cierre rápidos, que no es posible con los reguladores de tambor.

Los reguladores de tambor más pequeños con accionamiento de levas, a veces se denominan disyuntores principales. En realidad, tanto el regulador de tambor como el de levas son interruptores, de contactos grandes, múltiples y multipolares. Por lo tanto, los disyuntores principales pueden ser de los tipos planos, de tambor o con accionamiento de levas, y general mente tiene menos polos que los reguladores más grandes de tambor y de levas. Sin embargo, a uno le costaría distinguir entre un regulador pequeño de tambor o de levas y un disyuntor principal grande con accionamiento de tambor o de levas.

4.1.8 Arranque manual de motores de inducción de jaula de ardilla (scims).

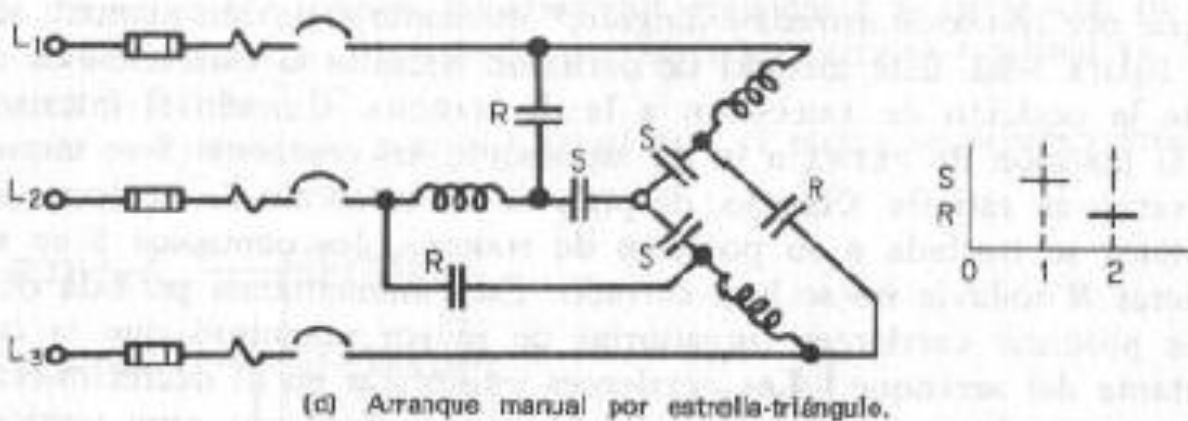
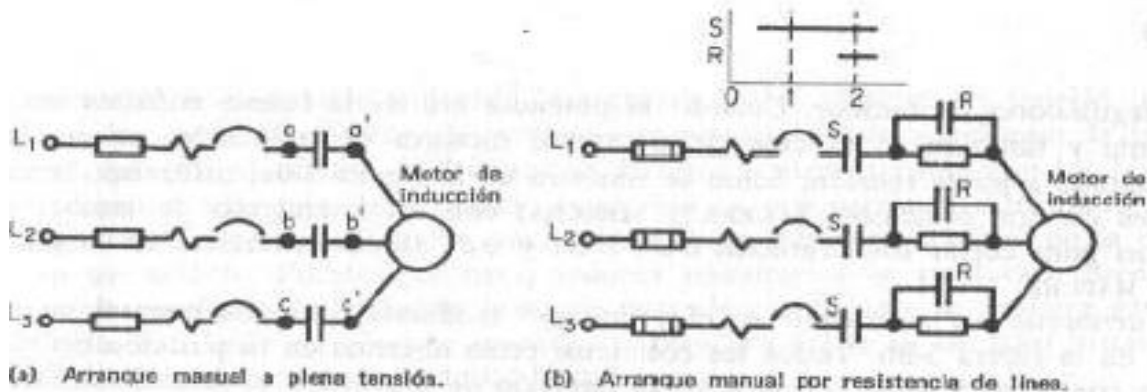
Dependiendo de los valores nominales de la potencia, pequeños o grandes motores pueden ponerse en marcha manualmente utilizando disyuntores principales o reguladores de tambor. Cuando la potencia útil de la fuente trifásica se a suficiente y también en el caso de pequeños motores de inducción , se emplea el arranque a plena tensión, como se muestra en la fig. 4.9a, utilizando interruptores de dos posiciones (fuera y marcha) con accionamiento de tambor o de levas para cerrar los contactos $a-a'$, $b-b'$ y $c-c'$, simultáneamente en la posición de marcha.

El arranque por resistencia en el primario mediante la conexión manual se muestra en la figura 4.9b. Todos los contactos están abiertos en la posición de fuera. Los contactos S están cerrados en la posición de arranque y, después de un adecuado espacio de tiempo, se cierran los contactos R en la posición de marcha. Este tipo de conexión como se muestra en el diagrama de la secuencia de conexiones de la figura 4.9b, se denomina conexión por transmisión en circuito cerrado, porque los contactos S que alimentan el estator del motor se cierran durante la transmisión de las posiciones de arranque a la marcha del interruptor. El arranque por ser del primario se realiza con la misma secuencia de conexiones



empleada en el arranque por resistencia del primario, por medio de la conexión manual, como se muestra en la figura 4.9b.

El arranque por conexión estrella-triángulo, mediante conexión manual, se muestra en la figura 4.9d. Este método de conexión necesita la transición en el circuito abierto de la posición de arranque a la de marcha. Cuando el interruptor se lleva de la posición de fuera a la de arranque, los contactos S se cierran y el motor arranca en estrella. Cuando después de un intervalo de tiempo adecuado, el interruptor se traslada a su posición de marcha, los contactos S se abren y los contactos R todavía no se han cerrado. Esta momentánea pérdida de potencia puede producir corrientes transitorias de mayor magnitud que la corriente en el instante del arranque. Las corrientes estatoricas en el decrecimiento transitorio a cero producen un flujo decreciente que induce una gran tensión en el circuito cerrado del rotor que gira a una velocidad determinada. La tensión inducida produce corrientes rotoricas que por la ley de Lenz tienden a mantener el flujo en el entre hierro: y ya que el rotor se mueve y conduce corriente, el flujo del entre hierro creado induce una tensión en el estator. Por lo tanto, en el mismo instante de la perdida de potencia, se induce una tensión en el estator de aproximadamente la misma magnitud pero defasada. Cuando toda la tensión (el 173 por ciento más) se aplica al estator, la tensión total del estator, dependiente de la fase de la tensión inducida en el instante, es la suma vectorial de la tensión inducida instantánea y del aumento de tensión que se aplica.



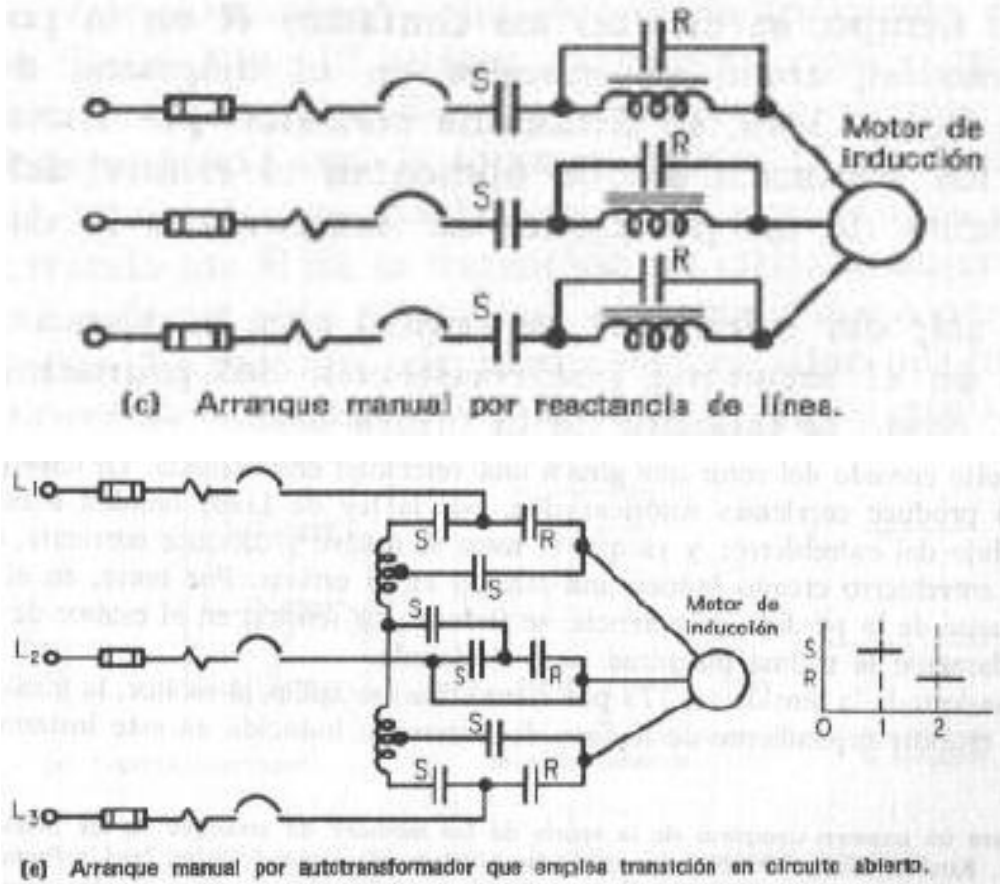


Fig.4.9 arranque manual por devanado parcial de un motor de inducción empleando interruptor con accionamiento de tambor en indicándose el diagrama de la secuencia.

Por lo tanto, la tensión de conexión transitoria puede sobre pasar al tensión total aplicada al estator si el motor se arranca a plena tensión con las bobinas de conexión triangulo. La corriente estatorica es por ejemplo y puede ser mayor que la corriente nominal de la red hasta un 600%. Puesto que estos valores transitorios se producen directamente como resultado del procedimiento de conexión empleado, se prefiere generalmente la transición en circuito cerrado, porque no existe ni un solo instante en el que el estator este desconectado a la red.

El arranque por autotransformador que emplea la transición en el circuito abierto, se muestra en la figura 4.9e. El estator recibe una tensión reducida (del autotransformador cuando los contactos S están cerrados) cuya magnitud y corriente resultante en el arranque varia con la toma escogida. Después de un espacio de tiempo adecuado, el interruptor puede llevarse a su posición de marcha abriendo los contactos S y cerrando R en la transición en circuito abierto. Aquí es necesaria la transición en abierto para evitar que se cortocircuite una parte del devanado del transformador. El método por auto transformador produce el mayor par de arranque por ampere de corriente en el arranque, en comparación con los métodos de arranque por tensión reducida y por resistencia y reactancia. El arranque por autotransformador en transición por circuito cerrado



también es posible como se indica en la figura 4.12.

El arranque por devanado parcial en el que el motor se arranca utilizando la mitad de la totalidad del devanado trifásico del estator con la consiguiente reducción de la corriente en el arranque (a causa de la mayor impedancia del estator), se muestra en la figura 4.10a,.La conexión por transición en el circuito cerrado se muestra en la figura 4.10b, y el diagrama de la secuencia, en la figura 4.10c, los contactos S se cierran cuando el interruptor esta en las posiciones de arranque y de marcha, mientras que los contactos R se cierran solo en la posición de marcha.

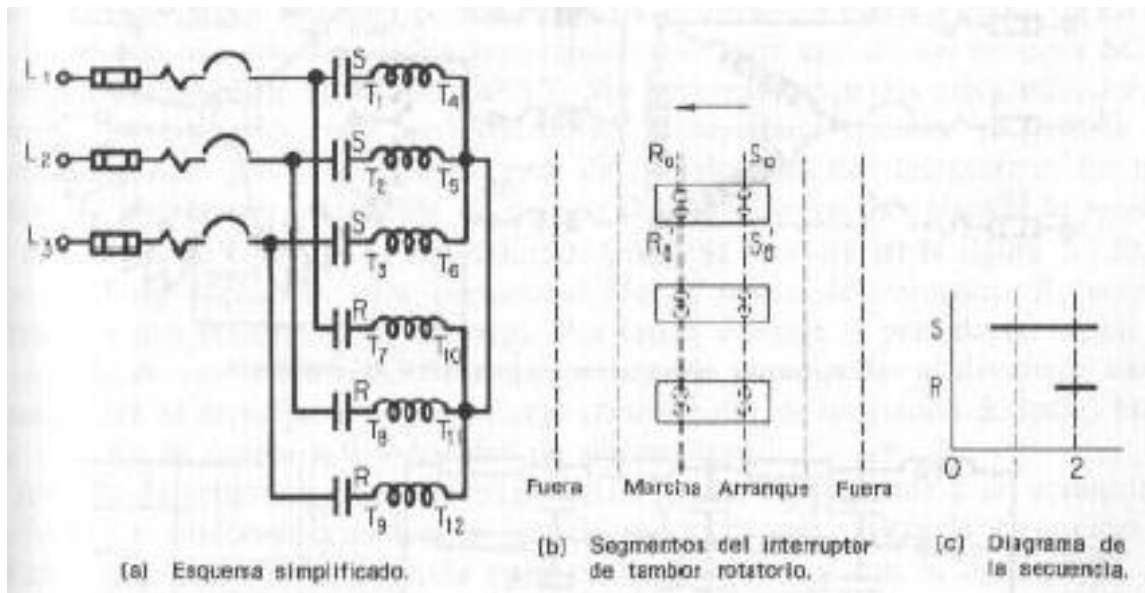


Fig.4.10 arranque manual por devanado parcial de un motor de inducción empleando interruptor con accionamiento de tambor e indicándose el diagrama de secuencia.

4.1.9 Arranque manual de motores de inducción de rotor bobinado (wrims).

De la misma manera que los motores de c.c, los WRIMs más pequeños pueden arrancarse utilizando arrancadores manuales planos, como se muestra en la figura 4.11a, y también los motores más grandes pero utilizando reguladores de tambor, como se muestra en la figura 4.11b. En la figura 4.11a, el estator se alimenta y se protege por medio de un disyuntor de sobre carga (OCB). El motor no arranca hasta que el arrancador manual por resistencia del secundario se haga girar libremente desde su posición abierta fuera a la posición de máxima resistencia del rotor. El motor se acelera al valor de la velocidad y deslizamiento determinados por la resistencia del rotor y alcanzara la máxima velocidad y el mínimo deslizamiento en la posición de marcha, donde el devanado del rotor esta cortocircuitado. Los valores nominales de las resistencias externas de arranque que se determinan generalmente para el servicio intermitente durante el arranque. Si se desea utilizar el arrancador de la figura 4.11a, para fines de control de la velocidad, entonces la resistencias se normalizaran para servicio continuo según el valor continuo de la corriente del rotor a cualquier valor de deslizamiento. Los motores más grandes de rotor bobinado pueden ponerse en marcha manualmente



mediante interruptores con accionamiento de tambor o de levas. Estos representan las mismas ventajas sobre los arrancadores planos. La figura 4.11b, muestra solamente el circuito del rotor, ya que el circuito del estator es el mismo que el de la figura 4.11a. Se emplea una secuencia de transición en circuito cerrado, y el primer grupo de resistencia de arranque quede cortocircuitado por los contactos S_1 , el segundo grupo por los S_2 y el ultimo por los S_1 , el segundo grupo por los S_2 y el ultimo por los S_3 . Según la magnitud y gravedad de la baja carga en el arranque pueden utilizarse grupos adicionales de resistencias de arranque y de contactos.

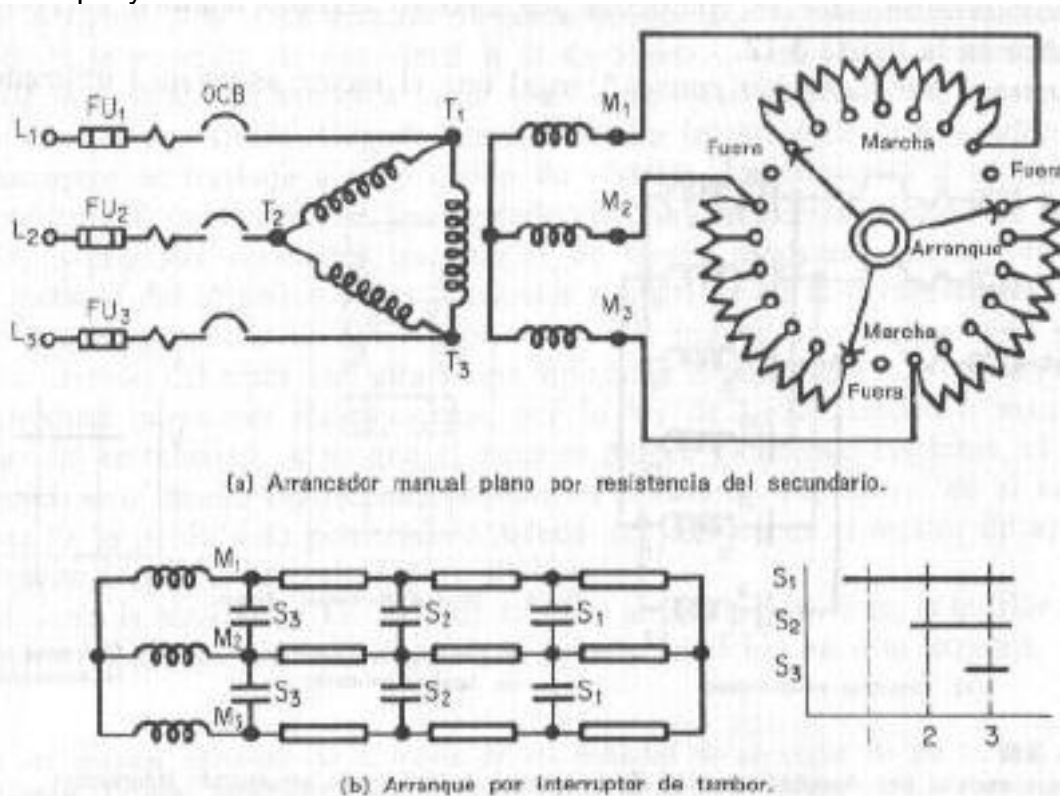


Fig.4.11 Dos métodos para el arranque manual de un motor de inducción de rotor bobinado.

4.1.10 Arranque manual de motores síncronos polifásicos.

Puesto que el estator de un motor síncrono es el mismo que el de un motor de inducción, el motor síncrono polifásico puede ponerse en marcha como un motor de inducción, el motor síncrono polifásico puede ponerse en marcha como un motor de inducción con sus devanados amortiguadores por uno de los métodos SCIMs. Sin embargo, en todos estos métodos el circuito de excitación esta cortocircuitado (desexcitado durante el periodo de arranque) hasta que el rotor este cerca de la velocidad de sincronismo. En este punto, el circuito de excitación de c.c es abierto y le queda aplicada la tensión de c.c, llevando al motor al sincronismo.

El método de arranque mostrado en la figura 4.12a, corresponde a un arrancador manual por autotransformador de tensión reducida que utiliza la transición en



circuito cerrado; ellos se presenta para poder compararla con la figura 4.9e.

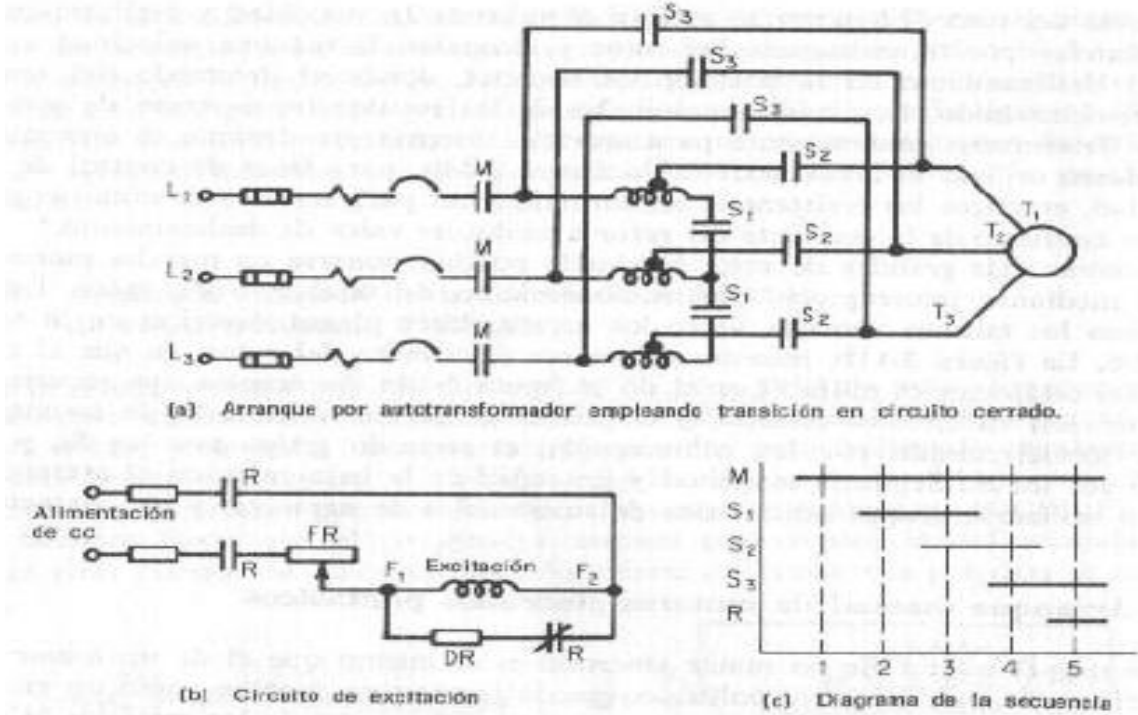


Fig.4.12 Arranque manual de un motor síncrono.

La primera posición de arranque, mostrada en la tabla de secuencias de la figura 4.12c, los contactos M están cerrados, pero el rotor no gira en esta posición. En la segunda posición de arranque, los contactos M y S_1 están cerrados, alimentando solo a los autotransformadores pero no al estator del motor síncrono. En la tercera posición de arranque mostrada en el diagrama de secuencias de la figura 4.12c, los contactos m, S_1 y S_2 están cerrados, arrancando el motor síncrono bajo condiciones de tensión reducida. Después de un apropiado intervalo de tiempo, el interruptor se lleva a la posición 4, donde los contactos S_3 se cierran y se abren los S_1 . Los primeros contactos a quedan cerrados antes de que se abran los últimos, para hacer posible la transición, en circuito cerrado, al mayor valor de la tensión del estator.

El motor acelera a la velocidad de sincronismo y el interruptor se lleva a la quinta posición; cerrando los contactos n.a, R, de la fuente de suministro de c.c y abriendo el contacto R, n.c, por lo que se cortocircuita el bobinado de excitación. Por lo tanto, dicho devanado se éxito y el motor se pone en sincronismo. En la posición 5, los contactos S también están abiertos. Como se muestra en el diagrama de la secuencia, en la posición de marcha, los contactos n.a M y S_1 están cerrados y el contacto R n.c, en el circuito de descarga del campo está abierto. Cuando se sitúa en la posición de fuera, el primer grupo de contactos se abre y se cierra el último. El motor se desconecta de las líneas de c.c y de c.a y la descarga de campo es absorbida por la resistencia de tirite para poder reducir la anulación del campo y resistir la alta tensión aplicada.



4.1.11 Arranque manual de motores monofásicos.

La conexión manual para motores serie o universal monofásicos puede ser la misma que se muestra para el motor serie de c.c. los motores monofásicos del tipo de inducción que necesitan arranque a tensión reducida también se conectan de forma análoga al motor de inducción polifásico considerado anteriormente.

Ventajas e inconvenientes de los arrancadores manuales.

Ventajas:

1. El tiempo que necesita para la secuencia de conexión puede variarse por el operario para acomodarla a las condiciones particulares de la carga acoplada al motor.
2. Los arrancadores manuales son más sencillos que los automáticos tanto en construcción como en mantenimiento. No se necesitan ni acoplamientos eléctricos ni relés, y existe menor posibilidad de averías.
3. Los arrancadores manuales son más compactos y de menor peso que sus equivalentes automáticos de la misma potencia, ya que incluyen menos equipo. En aquellos casos en que el espacio y el peso son factores de consideración, estos arrancadores pueden adquirir importancia.
4. Los arrancadores del tipo tambor y de levas pueden ser completamente protegidos y su ejecución estanca o a prueba de explosiones. Por tanto, son menos susceptibles de deteriorarse, a causa de la humedad y el polvo, que los arrancadores automáticos.
5. Los costes iniciales y de mantenimiento de los arrancadores manuales son menores que los de los automáticos.

Desventajas:

1. Existe una limitación física en el tamaño de los arrancadores accionados manualmente. Los arrancadores más grandes presentan gruesos contactos y se necesita un mayor esfuerzo para hacer girar la manivela. Los arrancadores manuales extra grandes se han automatizado por medio de relés de cascada, compensando algo este inconveniente. Pero no hay duda de que un gran arrancador manual llega a fatigar al operario si se utiliza con frecuencia y continuamente.
2. Aunque el arrancador pueda estar alejado del motor, el operario está en inmediata proximidad con los contactos de conexión por los que puede circular una gran fracción de potencia durante la transición. En pequeños arrancadores, esto no tiene importancia, pero en unidades más grandes, a pesar de la protección completa, la posibilidad de ruptura y explosión internas (aunque remotas) todavía existe.
3. En aquellos casos en que se realice una operación a distancia desde un sitio cerrado, el regulador de conexión necesita más espacio que una unidad de pulsadores que se utiliza para un arrancador magnético automático.



4. Debido a su limitado volumen, la posibilidad de formación de gases ionizados a causa de conexiones frecuentes en el interior del recinto cerrado puede conducir a descargas disruptivas y deterioros internos y extensos. Los interruptores principales o de tambor en servicio permanente pueden necesitar algunos medios de ventilación para expeler estos gases ionizados. Aunque esta condición también puede originarse en un arrancador magnético protegido, existe menor posibilidad de formación de gases ionizados por que el volumen es mayor (por necesidad). además, la conexión y desconexión de los contactos automático es de menor duración, produciendo menos gases ionizados.

4.2.1 Arrancadores automáticos de c.c.

Los arrancadores automáticos están proyectados para realizar las misma funciones que los manuales cuando se gobiernan, por un o más pulsadores de contactos momentáneos o interruptores de arranque manuales, accionados a distancia localmente. En general, se puede afirmar que los arrancadores automáticos salvan las imitaciones de los manuales en cuanto:

- Los arrancadores automáticos no cansaran a un operario durante los ciclos frecuentes de arranque-parada y, por tanto, este se inclinara por parar el motor cuando no esté en servicio, reduciendo la carga eléctrica.
- Los arrancadores automáticos no están limitados en magnitud física como están los manuales, por la fuerza humana que necesita para su manejo en secuencia de conexión.
- Tanto el operario como las unidades de contactos momentáneos de control pueden estar separados del arrancador por lo que aquel queda protegido por intervenir a distancia.
- Las pequeñas unidades de pulsadores son más fácilmente situadas en espacios confinados accesibles que los arrancadores de tambor o levas.
- Existe menor peligro de ruptura interna y menos necesidad de ventilación interior en los arrancadores automáticos.
- Los errores humanos quedan eliminados y el motor puede ponerse en marcha por un operario inexperto en un mínimo espacio de tiempo.

Como en todos los dispositivos automáticos, existen dos clases generales de funcionamiento: en bucle abierto y en bucle cerrado. El control en bucle abierto gobierna la potencia de un motor en una forma prefijada, con independencia del funcionamiento del motor. El control en bucle cerrado gobierna la potencia de un motor de una forma predeterminada que depende en parte del funcionamiento del motor. Los arrancadores automáticos de c.c del tipo bucle abierto se clasifican como arrancadores de aceleración de tiempo fijo, y aquellos del tipo en bucle cerrado como arrancador de aceleración por limitación de la corriente.



4.2.2 Arrancador de aceleración de tiempo fijo, c.c, que utiliza contactores de acción retardada.

En la figura 4.13 se muestra una variación de este principio donde se utilizan contactores de acción retardada en vez de relés de acción diferida. Un contactor de acción retardada es un relé inductivo ordinario con un manguito de cobre o de latón inserto en su núcleo. El efecto del manguito antimagnético hace que el relé funcione como un relé magnético instantáneo bajo condiciones de régimen permanente, pero como un relé de acción retardada, cuando circule una corriente transitoria por la bobina del relé. Por tanto, para los contactos normal cerrados del relé de la figura 4.13, una corriente en aumento en la bobina del contacto producirá un retraso al abrir los contactos 1A, 2A y 3A, respectivamente y una corriente en disminución producirá un retardo al cerrar los mismos contactos. Este retraso es debido a la creación de una fuerza contra magnetomotriz debida a las corrientes de folcalt inducidas en el manguito en sentido contrario a la corriente de aumento o en disminución, en concordancia con la ley de Lenz.

El arrancador de la figura 4.13 funciona de la siguiente manera:

- Se pulsa el botón de arranque de contacto momentáneo y se mantiene a si lo suficiente para permitir que los contactores M, 1A, 2A y 3A, hagan funcionar sus respectivos n.a y n.c. un temporizador mecánico "T", acoplado al pulsador, activa una alarma que indica cuando puede soltarse el botón. Al soltar el botón de arranque se reconecta el temporizador.
- Cuando se ha soltado el botón de arranque, todos los relés quedan excitados. El relé M en la línea de control 4 queda excitado por medio del contacto auxiliar, en paralelo con el botón de arranque, con su contacto de enclavamiento shuntado en el contacto 3A. El relé m se desexcitara en el caso de: Baja tensión, Anulación de campo, Sobrecarga, Pulsando el botón de paro, Fusible fundido en el circuito de la línea del motor, Fusible fundido en circuito de control.
- El motor arranca a plena resistencia de arranque en serie con el inducido y plana corriente de excitación, puesto que el relé 3A, esta excitado.
- El contactor de retaso 1A, en la línea de control 1, desexcitado, por el contacto del relé M, produce un retraso específico en sentido opuesto a la disminución de corriente en su bobina y, por último, vuelve al reposo, reestableciendo sus contactos abiertos a la condición de n.c. el motor se acelera a mayor velocidad por la reducción de la resistencia en serie al quedar 1A, cortocircuitados.
- Simultáneamente al cierre de los contactos 1A, de la resistencia en serie, el contactor de retraso 2A, queda desexcitado en la línea de control 2 debido a la apertura de los contactos de 1A, de esta. Después de un retraso específico, la bobina 2A, abre la línea de control 3. El motor se acelera a mayor velocidad debido a la reducción de la resistencia en serie al quedar los contactos 1A y 2A cortocircuitados.



- A la vez que ocurre el cierre de los contactos 2A, en bornes de la resistencia en serie, se abren los contactos 2A, en la línea de control 3, desexcitando la bobina de retraso 3A. Después de un retraso específico, la bobina 3A, abre, cortocircuitando el resto de la resistencia en serie con el inducido, desconectando el acoplamiento 3A, de la línea de control 4, y también el reóstato de campo para permitir que la velocidad aumente al valor de ajuste (este último es de echo un quinto punto de aceleración).

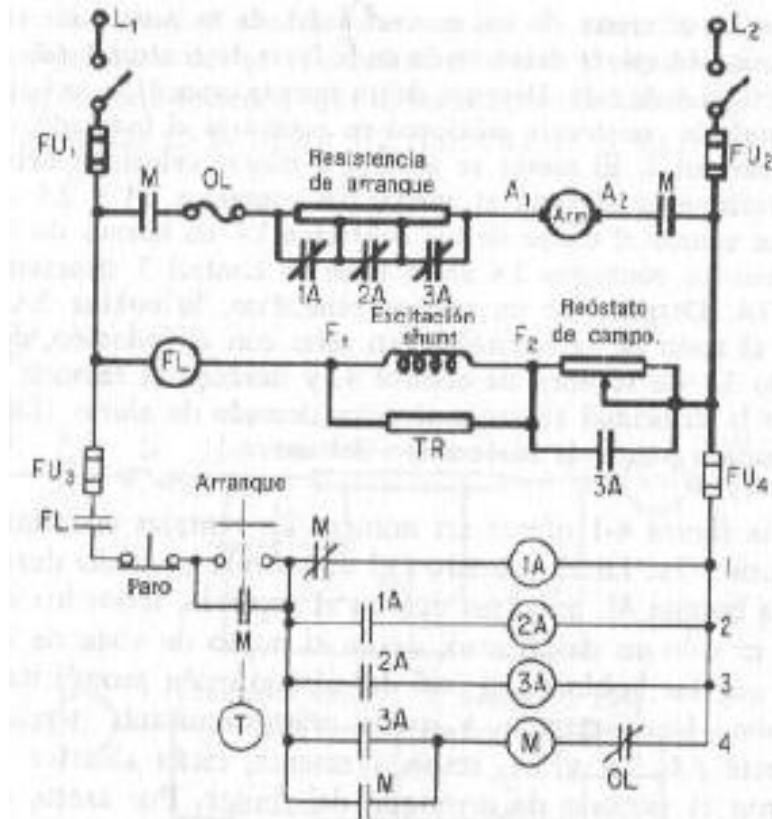


Fig.4.13 Arrancador de aceleración, de tiempo fijo, de c.c, empleando contactores de acción retardada.

4.2.3 Arrancador de aceleración por tiempo fijo, de c.c que utiliza relés de amortiguador.

Otro perfeccionamiento sobre el arrancador de aceleración de tiempo fijo, de c.c, que utiliza relés de amortiguadores, mostrado en la figura 4.14, este arrancador también usa relés de amortiguador, pero procura salvar los inconvenientes del gran número de relés excitados durante el periodo de marcha y proporciona retardo ajustables durante la secuencia de arranque. El arrancador mostrado en la figura 4.14 funciona de la siguiente manera:

1. Pulsando el botón de arranque se excita la bobina M y cierra los contactos M n.a. El motor arranca a plena tensión con toda la resistencia en serie con el inducido a plena corriente de excitación, porque el contacto 3A, n.c. shunta el reóstato de campo.



2. El relé de amortiguado inductivo de acción retardada, TD_1 , también es excitado simultáneamente a través de los contactos M y de los contactos del relé desexcitado 3A. Después de un adecuado retardo, el TD_1 cierra sus contactos n.a., excitando simultáneamente el relé instantáneo de control 1A, y el relé de acción retardada TD_2 .
3. Cuando el relé n.a. cierra, cortocircuita un tercio de la resistencia en serie con el inducido, haciendo que el motor se acelere a mayor velocidad. Después de un tiempo de espera adecuado, TD_2 , cierra sus contactos n.a., excitando simultáneamente, el relé instantáneo de control 2A, y el relé de acción retardada TD_3 .
4. Cuando el relé n.a. 2A, cierra, cortocircuita los dos tercios de la resistencia en serie con el inducido, haciendo que el motor se acelere a una velocidad mayor. Después de un tiempo de espera adecuado, el TD_3 cierra sus contactos n.a., excitando el relé instantáneo de control 3A, y cortocircuitando la resistencia restante en serie con el inducido.
5. El relé de control 3A, es el único relé que queda excitado junto con M porque, cuando el primero lo está, abre sus contactos n.c., 3A, en serie con TD_1 . Cuando el relé TD_1 esta desexcitado, este simultáneamente desconecta los relés 1A y TD_3 . Cuando el relé TD_1 esta desexcitado, este simultáneamente desconecta los 2A y TD_3 . El relé 3A permanece excitado por medio de su enclavamiento eléctrico que shunta los contactos TD_3 . Se observa que, aunque 1A y 2A estén desexcitados, toda la resistencia en serie del inducido está shuntada por los contactos de 3A. A la vez, se dispone un quinto contacto de aceleración cuando los contactos n.c. 3A, en bornes del reóstato de campo, quedan abiertos, y el motor alcanza su velocidad final establecida. El arrancador de c.c. De la figura 4.14 tiene las siguientes ventajas:
 1. El retardo es ajustable mediante el uso de relés de amortiguador.
 2. Todos los relés de acción retardada están desexcitados durante el periodo de marcha y pueden ser de funcionamiento intermitente.
 3. Un mínimo número de relés esta excitado en periodo de marcha para así ahorrar energía y reducir el calentamiento en el interior del arrancador.

Los arrancadores que utilizan la misma secuencia de contactos que de la figura 4.14 también son factibles empleando relés que tengan un mecanismo de escape, de palanca, de amortiguador o de retardo, cámaras neumáticas, imanes permanentes, etc., para habilitar el retardo necesario de aceleración en tiempo fijo.

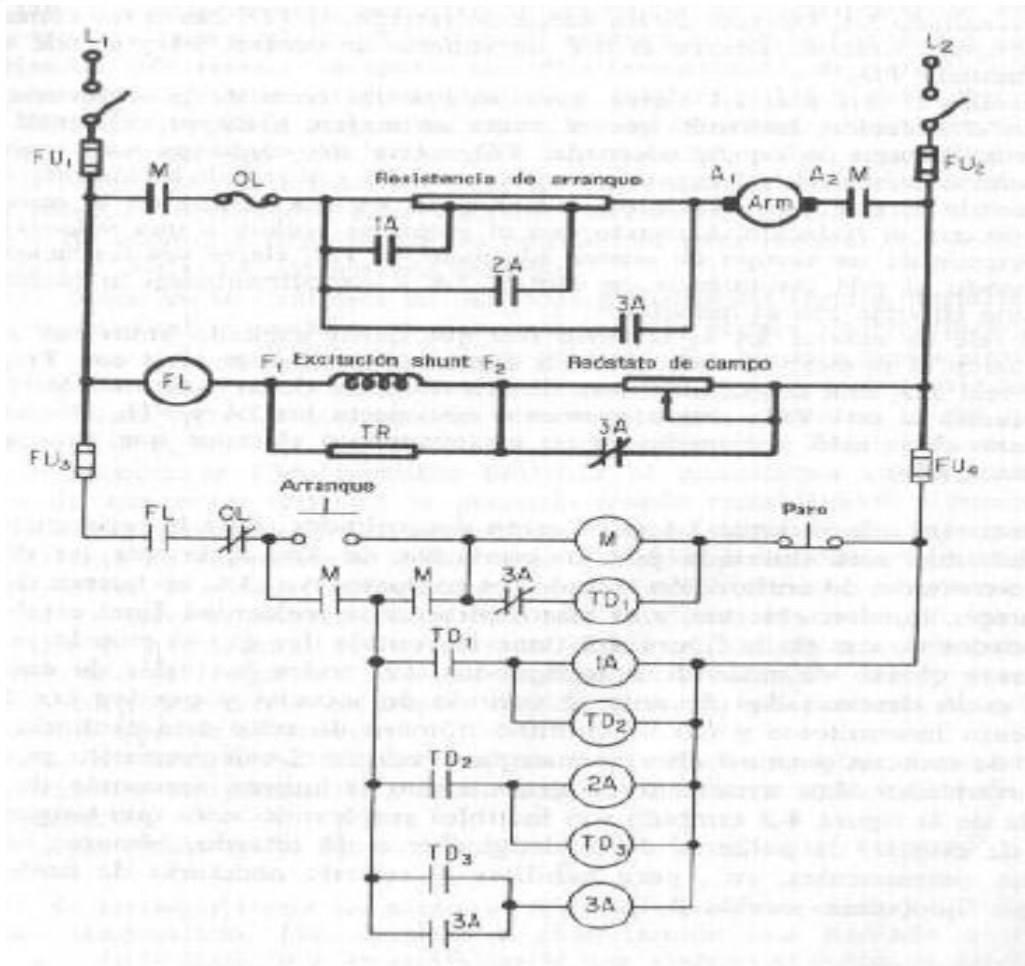


Fig.4.14 Arrancadores de aceleración, de tiempo fijo, de c.c., empleando relés de amortiguador.

4.2.4 Arrancador de aceleración por tiempo fijo, de c.c, que utiliza un temporizador motorizado o un mecanismo de tiempo.

Un solo relé temporizado de acción retardada que tenga contactos secuenciales múltiples puede utilizarse para habilitar la secuencia de aceleración de tiempo fijo que se precisa para acelerar el motor. El arrancador de la figura 4.15 emplea un temporizador motorizado (un motor síncrono temporizado, de poca velocidad que tiene contactos de tiempo afianzados a un tambor aislado) para cerrar los contactos TM_1, TM_2 y TM_3 , respectivamente en una secuencia predeterminada. Estos contactos excitan los relés de control n.a. 1A, 2A y 3A de manera análoga.

Sin embargo todos los mecanismos de tiempo, sin distinción alguna, necesitan un método de reconexión automática ya que la secuencia podría interrumpirse temporalmente a causa de una interrupción de energía. En algunos temporizadores mecánicos los contactos de la armadura se devuelven a su



posición original de arranque mediante pesas o resortes. En los otros casos, como en el del motor temporizado de la figura 4.15, los contactos normal cerrados TM_5 y M, en serie con dicho temporizador TM, permiten devolver el mecanismo temporizador a su posición de arranque (cuando la potencia queda restablecida) y función hasta que abre su contacto TM_5 . Por tanto, el motor temporizado es capaz de funcionar durante la secuencia y volver a la posición de arranque, cuando la potencia se vuelve a aplicar, independientemente del botón de arranque n.a. No obstante, ya que la bobina de M no está excitada, el cierre de los contactos 1A,2AY 3A durante el periodo no afecta el arranque o no produce efecto alguno. Sin embargo, a causa del tiempo de reconexión interpuesto, no se pueden admitir paradas y arranques rápidos (cierres y aperturas sucesivos) si se aplica este tipo de arrancador.

Las secuencias de tiempo del motor temporizado pueden ajustarse, como en todos los mecanismos temporizados, y esta resulta una ventaja prominente de este tipo de arrancador. El arrancador mostrado en la fig. 4.15 funciona de la siguiente manera:

1. El botón de arranque cierra los contactos M, n.a., cuando es excitado el relé M.
2. El motor temporizado, TM, empieza a girar cuando esta excitado a través de TM_4 n.c. de la línea 1_a y los contactos M que shuntan el botón de arranque, cerrando TM_5 . TM_5 se cierra y permanece así hasta el punto 7.
3. El temporizador del motor funciona cerrando TM_1, TM_2 y TM_3 , sucesivamente. Estos aceleran el motor mediante la excitación de los relés 1A,2AY 3A, por turno, como está previsto por el temporizador. Cuando 3A cierra, el motor va en marcha a plena tensión.
4. El motor temporizado, TM, se para cuando TM_4 n.c. es activado, desconectando la línea 1_a .
5. Con el motor en marcha a plena tensión, todos los contactos TM del motor temporizado se hallan en estado excitado.
6. Cuando se pulsa el botón de paro, el relé M se desexcita y el motor se para.
7. Pero ahora el motor temporizado es excitado a través de los contactos n.a. TM_5 y M n.c. en la línea 1_b . El motor temporizado continúa funcionando, abriendo simultáneamente TM_1 a través de TM_3 y TM_5 , cerrando simultáneamente TM_4 .
8. Cuando TM_5 es abierto, el motor temporizado se para y ahora los contactos están completamente reciclados y dispuestos para acelerar de nuevo el motor.
9. Observe que en caso de sobrecarga anulación de campo, o apertura del interruptor principal, sea cuando seas, durante y después de la secuencia de aceleración, el motor temporizado continúa en marcha debido al TM_5 n.a. (cerrado en la etapa 2) y la línea 1_b , hasta que todos los contactos estén reconectados y se abra TM_5 (etapas 7 y 8). Esto ocurre



arranque también excita 2HC, manteniendo así mismo el contacto 2A, n.a., abierto. Por consiguiente el motor arranca con la máxima resistencia en serie del inducido a plena tensión.

2. El botón de arranque y el contacto de enclavamiento n.a., m cortocircuitan la bobina de retención 1HC, y la corriente disminuye en dicho relé de acuerdo con su constante de tiempo inductiva. Cuando esta corriente es lo bastante pequeña el contacto 1A,n.a. se cierra como resultado de la f.m.m del relé de 1AC. El motor se acelera a mayor velocidad con el 1A cerrado.
3. La bobina de retención 2HC, cortocircuita por el contacto cerrado 1A, sufre una disminución y por fin se cierra el contacto 2A, acelerando el motor de nuevo.
4. La bobina de retención 3HC, cortocircuita por el contacto cerrado 2A, experimenta una disminución exponencial, y después de un periodo de tiempo, el contacto 3A, se cierra y el contacto acelera a la velocidad deseada, que se ha determinado mediante el ajuste del reóstato de campo cuando se abre el contacto n.c 3A, que lo shunta.

Este arrancador presenta el inconveniente de que necesita que los relés M, 1AC,2AC y 3AC estén siempre excitados; por otro lado los relés diferenciales de bobinas de retención pueden proyectarse con entrehierros muy pequeños, que originaran f.m.ms. Fuertes en comparación con los relés de amortiguador de acción retardada, por lo que las bobinas de los relés diferenciales de las figura 4.16 no necesitan tanta corriente. Sin embargo un segundo inconveniente de este arrancador está en el tiempo de cierre y depende de la constante de tiempo inductiva de la bobina de retención HC y no es de fácil ajuste. Tanto si son susceptibles de ajuste como si no, el único y mayor inconveniente de los cinco arrancadores de aceleración de tiempo fijo, está en que la secuencia temporizada es completamente independiente de la corriente de carga y de la velocidad del motor. Por lo tanto, si el motor está muy cargado, puede ser acelerado demasiado rápidamente por medio de un arrancador de tiempo definido. Análogamente, si la carga es muy ligera o marcha en vacío, el motor puede ser acelerado demasiado lentamente, malgastando un considerable tiempo de producción. No existe retroacción debido a la naturaleza de bucle abierto de los dispositivos de control descritos. Este inconveniente queda paliado mediante los dispositivos de aceleración por limitación de la corriente en bucle cerrado descritos a renglón seguido.



1. Pulsando el botón de arranque, se pone en marcha el motor a plena excitación y a completa resistencia en serie del inducido cuando se cierran los contactos Principal y auxiliar. el motor se acelera partiendo del reposo, con una c.d.t máxima en la resistencia de arranque en serie y una c.d.t. prácticamente nula en bornes del inducido. Cuando se acelera el inducido, la f.c.e.m. y la tensión en sus bornes aumentan en función de la velocidad ($E = k\phi\omega$). El relé V_1 , proyectado para cerrar sus contactos n.a. aproximadamente a un 50 por ciento de la tensión nominal, no se cerrara y acelerara el motor hasta que la velocidad de este, a pleno flujo de excitación, desarrolle una f.c.e.m. de al menos aquel orden. Además, para que la f.c.e.m. llegue a alcanzar ese valor, la corriente debe limitarse lo suficiente para deducir la c.d.t. en bornes de la resistencia en serie y de este modo aumenta la c.d.t. en bornes del inducido.
2. Cuando el relé V_1 cierra sus contactos n.a. V_1 en la línea de control 2, el relé de mando 1A, es excitado, cortocircuitando el primer contacto de la resistencia en serie del inducido. La corriente de punta aumenta, el motor se acelera y se desarrolla una mayor f.c.e.m. Cuando esta alcance el 70 por ciento de su valor nominal, V_2 quedará excitado.
3. Cuando el relé V_2 cierra sus contactos n.a. V_2 en la línea de control 3, el relé 2A es excitado, cortocircuitando el primer contacto de la resistencia en serie del inducido. La corriente de punta aumenta, el motor se acelera y se desarrolla una mayor f.c.e.m. Cuando la f.c.e.m. alcance el 85 por ciento de la tensión nominal, el relé V_3 se excitará.
4. Cuando V_3 cierra sus contactos en la línea de control 4, el relé de mando 3A cortocircuita el último contacto de la resistencia en serie y, simultáneamente, abre el reóstato de campo a su ajuste de velocidad prefijado. El motor se acelera a su ajuste de carga, con el inducido a plena tensión.

Las ventajas de este arrancador de c.c. residen en que el motor no es acelerado a una etapa de mayor velocidad hasta que la corriente está suficientemente limitada y se haya alcanzado el grado de velocidad necesaria (medida por la f.c.e.m.). Por tanto, el tiempo necesario para la aceleración varía con la naturaleza de la carga acoplada al motor, y este es acelerado automáticamente a su debido tiempo en vez de a un tiempo definido. Una segunda ventaja de este arrancador está en la protección que ofrece al motor en caso de una fuerte carga sostenida que podría ocasionar una acusada disminución de la velocidad; el relé V_3 podría allegar a la posición de reposo si la bobina de sobrecarga dejase de funcionar; y no accionaría el contacto de cierre 3A hasta que las condiciones de carga se restablecieran a su valor nominal. Sin embargo, existen algunos inconvenientes para la limitación de la velocidad mediante el uso de relés de f.c.e.m. El primero está en que los relés son difíciles de ajustar para proporcionar la acción deseada a tensión y velocidad adecuadas para todas las condiciones de carga. Los relés son dispositivos



inductivos, y no responden de la misma forma a una rápida corriente transitoria en aumento como lo hacen a una lenta. Un segundo inconveniente está en que los siete relés están excitados durante el periodo de marcha. En pequeños arrancadores de hasta casi 5 CV, los relés de control pueden eliminarse y los relés V_1, V_2 y V_3 pueden accionar los contactos 1A, 2A y 3A directamente. Un tercero está en la molesta posibilidad de un descenso acusado de la velocidad como resultado de una fuerte carga o de una baja tensión. Un cuarto está en que este dispositivo no puede utilizarse cuando se emplea un control de velocidad por debajo de la velocidad básica.

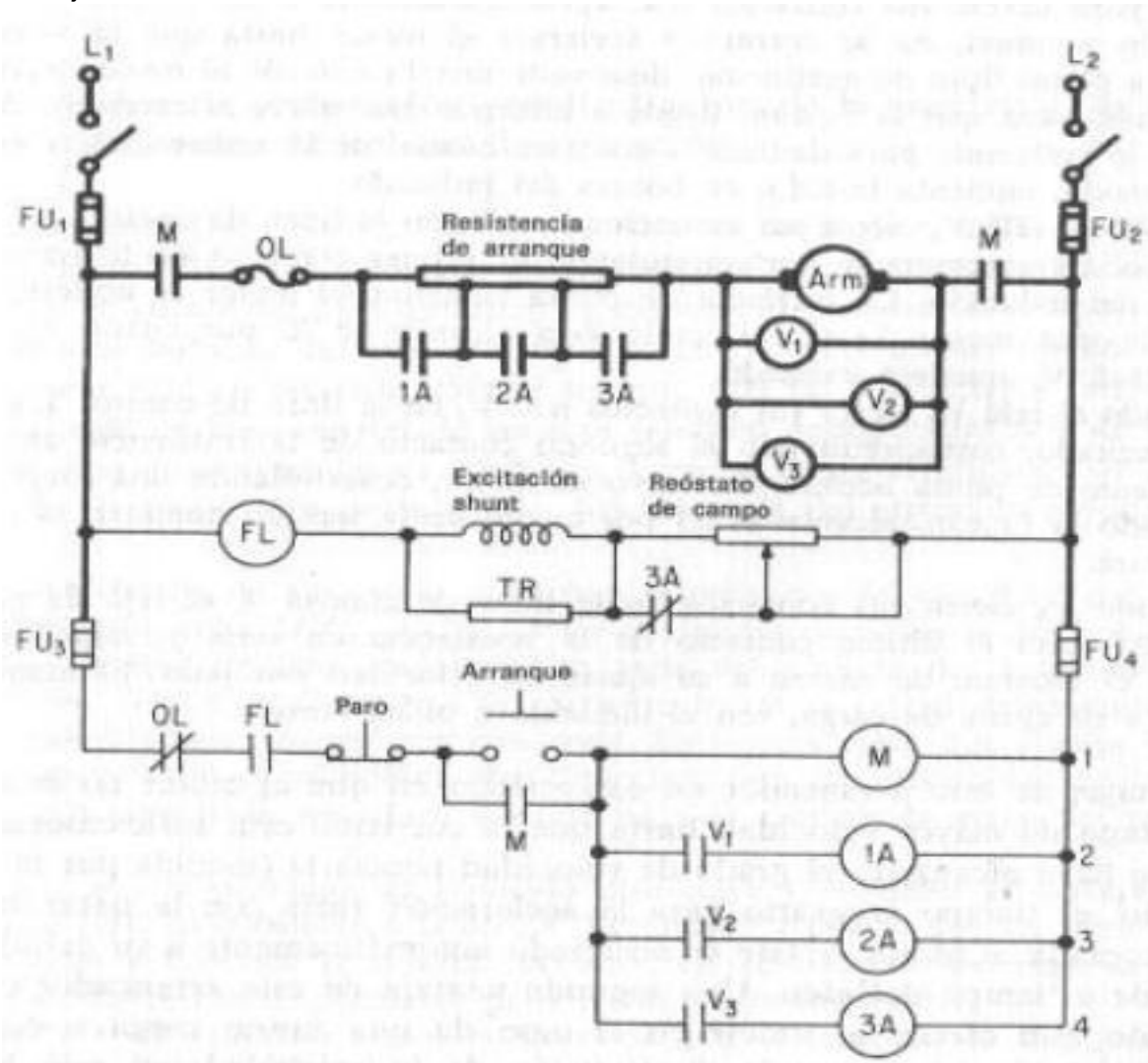


Fig. 4.17 Arrancador de aceleración por limitación de la corriente, de c.c empleando relés de f.c.e.m. (metodo de limitación de velocidad)



4.2.7 Arrancador de aceleración por limitación de la corriente, de c.c, que utiliza relés de retención de bobina de retención.

Los relés diferenciales, pueden utilizarse para sensibilizar la corriente de inducido y dar respuesta cuando esta ha sido limitada lo suficiente para producir la aceleración necesaria. Las bobinas del relé designadas por HC (bobina de retención) tienden a retener el relé en posición abierta siempre que la corriente y la f.c.e.m. sean grandes. Tal relé de baja resistencia serie es también denominado relé de bloqueo serie de c.c. el arrancador de la figura 4.18 funciona de la siguiente manera:

1. Pulsando el botón de arranque se excitan el contactor M y el 3AC del circuito de control y los relés 3HC, 1HC y 1A en el circuito de potencia del inducido por que las bobinas 3HC , 1HC reciben la corriente interruptiva inicial de magnitud suficiente para bloquear los contactos del relé. La bobina 3AC, que shunta M en el circuito de control, es un relé de cierre que funciona con efectividad en presencia de 3A solo cuando la armadura del relé ha sido succionada cerca del punto de cierre.
2. A medida que la corriente de inducido disminuye y el motor se acelera, la corriente en 1HC en oposición a la de 1A disminuye; y puesto que 1A tiene muchas más vueltas y conduce la misma corriente, en condiciones de régimen permanente, origina la f.m.m. suficiente para cerrar los contactos 1A.
3. La corriente de inducido ahora es desviada por el trayecto de baja resistencia de los relés serie 2HC, 2A y 1A por los contactos n.a. 1A cerrados por el relé 1A.cuando 1A se cierra, interrumpe una corriente y el motor se acelera. El régimen transitorio en 2HC, en serie con 2A, es suficiente para permitir que el primero domine al último hasta que la corriente vuelva a un valor suficientemente estable y disminuido. No obstante, en condiciones de régimen permanente, 2A cierra sus contactos n.a.
4. La corriente de inducido ahora es desviada e irrumpe por el trayecto de baja resistencia de los relés serie 3HC,3A, los contactos cerrados 2A, el relé 2A, los contactos cerrados 1A, y el relé 1A. Durante el periodo transitorio de la corriente, el 3HC es suficiente para dominar el 3A. Pero cuando la velocidad y la aceleración del motor producen la suficiente f.c.e.m. para reducir la corriente de inducido, el relé 3A en combinación con su bobina auxiliar 3AC, que shunta M, cierra los contactos n.a. 3A, derivando toda la red de la resistencia de arranque y las bobinas del relé sobre la línea. La bobina AC sirve para retener los contactos n.a. 3A en posición cerrada cuando el relé 3A esta cortocircuitado.
5. En forma simultánea, los contactos 3A n.c. (que shunta el reóstato de campo) se abren, y el motor se acelera a su valor final de regulación. La resistencia R, shuntada por los contactos M n.c., sirve para que vuelva



rápidamente a su posición de reposo cuando el motor este parado, reconectando todos los relés.

La ventaja principal del mencionado arrancador de c.c. reside en su relativa simplicidad, solo se necesitan tres relés además del m. su mayor inconveniente está en que, a causa de sus bobinas serie, no se acciona fácilmente al control de la velocidad para valores de esta inferiores en bornes del inducido. Un segundo inconveniente está en que el valor nominal de la corriente determina el proyecto d en las bobinas de funcionamiento y de bloqueo, por lo que un arrancador no es de fácil adaptación para una gama de motores de diferentes regímenes nominales. Además, para valores nominales de corriente más elevados, la corriente de inducido es tan grande que las bobinas de bloqueo deben ser bobinadas con gruesas pletinas de cobre de unas pocas vueltas, limitando extraordinariamente el proyecto y haciéndolo difícil de construir.

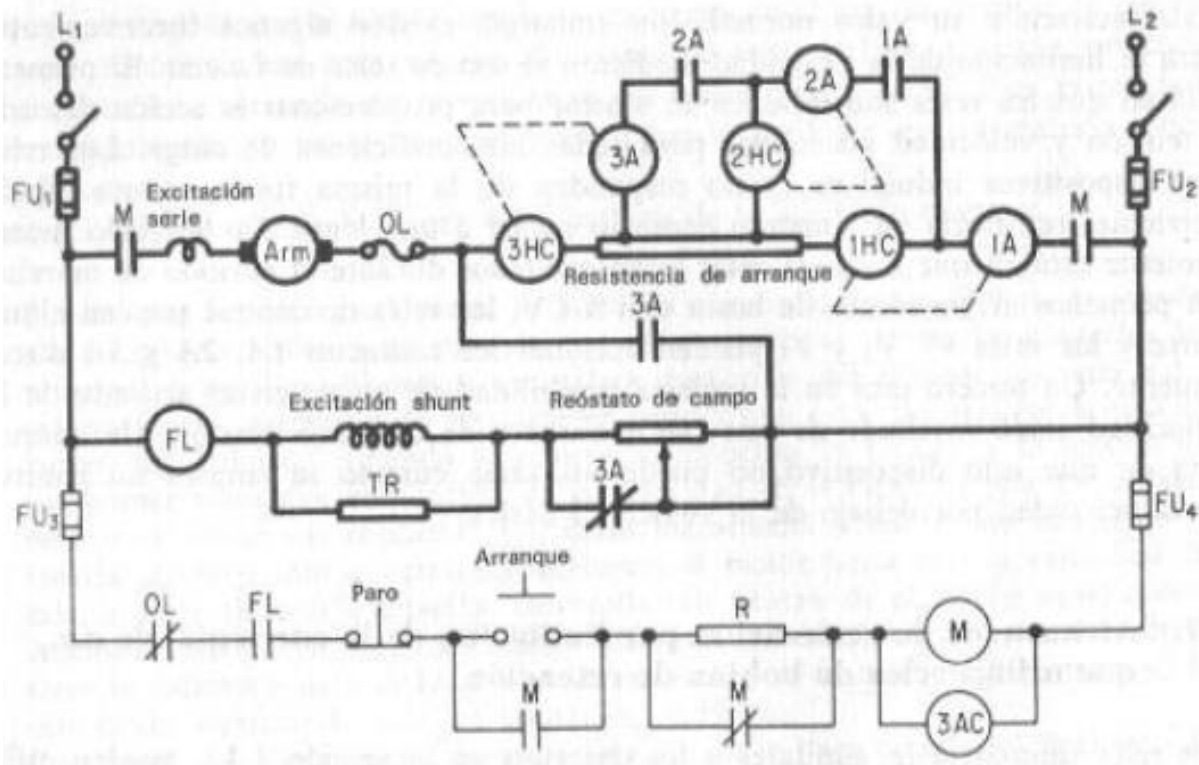


Fig.4.18 Arrancador de aceleración por limitación de corriente, de c.c. empleando relés de retención.

4.2.8 Arrancadores de aceleración limitador de la corriente, de c.c. que utiliza relés en serie.

Los relés serie de aplicación rápida, bobinados con unas cuantas vueltas de hilo grueso o pletinas, pueden utilizarse directamente para sensibilizar la corriente irruptiva de inducido y, en consecuencia, acelerar el motor. Los fuertes muelles y los topes de entrehierro de estos relés pueden ajustarse mecánicamente para proporcionar maniobras rápidas de cierre así como rápidos disparos de los contactos. La figura 4.19 muestra un arrancador de relé serie, de c.c., utilizado



para poner en marcha un motor serie de c.c., que funciona como sigue:

1. Cuando se pulsa el botón de arranque, el relé M alimenta el circuito de potencia del inducido y todas las líneas de control. La fuerte corriente interruptiva que pasa por el relé 1S abre los contactos 1S n.c. en la línea de control 2. El relé 1S es un relé, de breve constante de tiempo, de acción rápida comparado con 1A, y el motor arranca con toda la resistencia del inducido en serie. Después de que la corriente irruptiva de arranque desciende a un valor para el que 1S no puede vencer por más tiempo la acción de su resorte, el relé 1S cede quedando sus contactos en estado desactivado.
2. La línea de control, 2 está alimentada mediante los contactos 1S n.c. del relé desexcitado 1S. esta excita el relé de control 1A, haciendo que cierren sus contactos 1A. La corriente irrumpe ahora a través del relé de baja resistencia 2S y el contacto 1A n.a., cortocircuitando el relé 1S y una parte de la resistencia de arranque en serie. El motor se acelera hasta que la corriente irruptiva de arranque decrece a un valor en el que 2S no puede permanecer cerrado por más tiempo y se abre el relé 2S.
3. La línea de control 3, alimentada por los contactos 2S, hace que funcione el relé 2A, cerrando sus contactos n.a en bornes de la resistencia de arranque. La corriente ahora irrumpe a través del relé de baja resistencia 3S, cortocircuitando los relés 2S y 1S así como la resistencia adicional en serie del circuito del inducido. El motor se acelera hasta que la corriente irruptiva de arranque desciende a un valor para el que 3S no puede permanecer cerrado por más tiempo y se abre.
4. La línea de control 4 es alimentada, haciendo funcionar el relé 3A y cortocircuitando todos los relés serie del circuito de potencia así como la resistencia en serie del inducido. El motor se acelera a su velocidad normal y carga nominal. Como el motor es un motor serie, un dispositivo centrifugo contra el exceso de velocidad en la línea de control 1 protege al motor contra el embalamiento en caso de eliminación de la carga mecánica.

Cuando el arrancador de relés serie de la figura 4.19 está funcionando, 4 relés permanecen siempre excitados: el relé M y los tres relés de control 1A,2A y 3A. Este es el mayor inconveniente de este arrancador. No obstante, el proyecto de su bobina presenta los mismos inconvenientes que los señalados anteriormente. Se observara, también que la operación de los relés serie es unas 100 veces más rápida que la de los relés de control. Por tanto, no existe la posibilidad de que cuando el motor se acelere, un relé de control cierre sus contactos antes de que se abra un relé serie. El arrancador de relés serie y su método de control se consideran de gran seguridad, aunque el relativo gran número de relés excitados y los enclavamientos entre los relés serie y de control aumentan en algo el coste de mantenimiento. Este inconveniente se palia en el arrancador por caída de tensión, de bobina de retención.

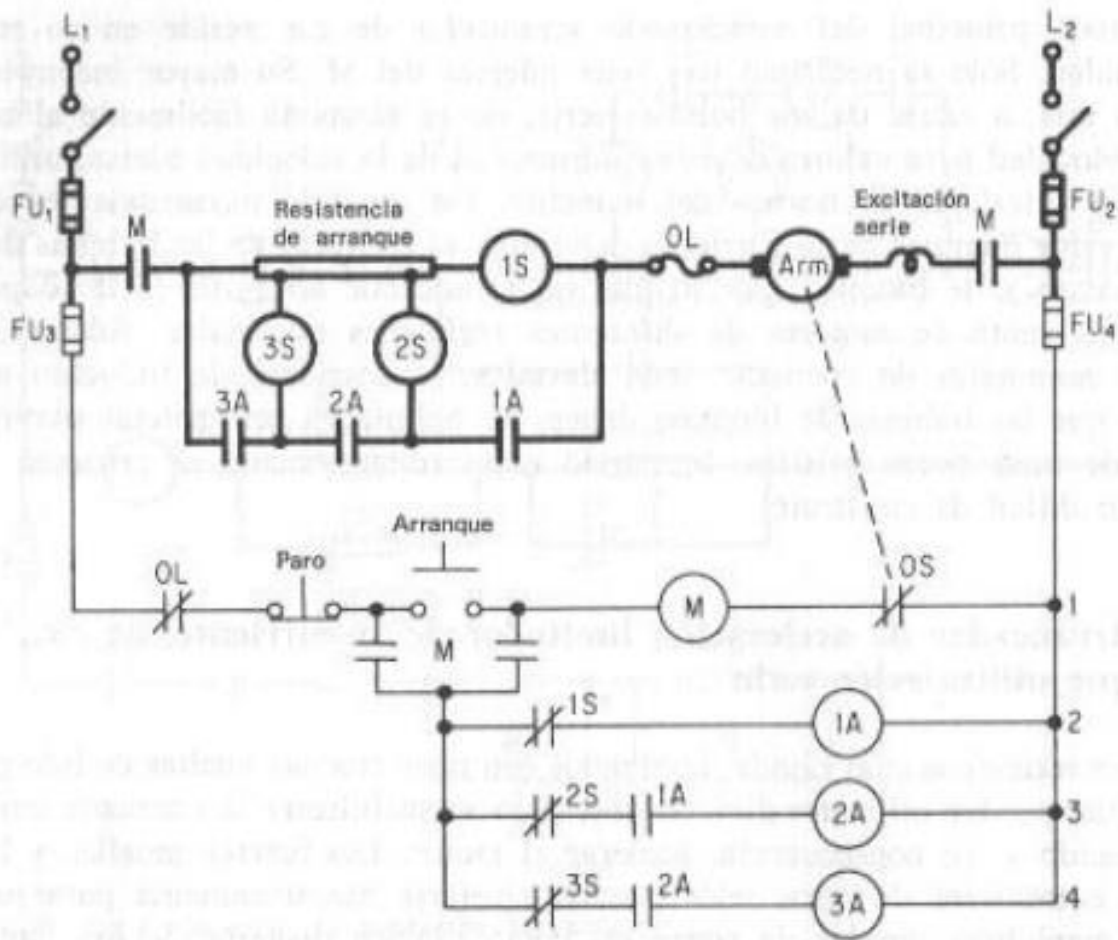


Fig. 4.19 Arrancador de aceleración por limitación de corriente, de c.c., empleando relés serie.

4.2.9 Arrancador de aceleración por limitación de la corriente, de c.c., que utiliza bobinas de retención (aceleración por caída de tensión).

La figura 4.20 muestra un arrancador de bobina de retención, de c.c., que se emplea para poner en marcha un motor en serie. Este arrancador sensibiliza la corriente transitoria que circula por la resistencia de protección de arranque por medio de los relés de bobina de retención HC. Estos son relés diferenciales cuyas f.c.e.ms. Están en oposición. El funcionamiento de la figura 4.20 es el siguiente:

1. Pulsando el botón de arranque se excita el contactor M, cerrando sus contactos principales y auxiliares. La corriente de inducido irrumpe en el circuito de potencia, ocasionando unas grandes caídas de tensión en bornes de todas las bobinas de retención de los relés diferenciales. Por tanto, los contactos 1A, 2A y 3A permanecerán abiertos a medida que el motor se acelera.
2. A medida que la corriente transitoria disminuye, la tensión en bornes del relé más debilitado HC 1 se hace lo suficientemente pequeña, en el tiempo, para hacer que su contra bobina 1A cierre sus contactos 1A n.a. Cuando



estos últimos se cierran, el relé HC 1 queda cortocircuitado, así como una parte de la resistencia de arranque en serie con el inducido del motor. El motor se acelera a mayor velocidad debido a la corriente irruptiva del inducido.

3. A medida que la corriente de punta disminuye, la tensión aplicada al rel debilitado HC 2 se hace lo suficientemente pequeña con el tiempo, para hacer que su contra bobina 2A cierre sus contactos 2A n.a. Cuando estos últimos se cierran, el relé HC 2 queda cortocircuitado, así como una segunda parte de la resistencia de arranque en serie con el inducido del motor. El motor se acelera a su mayor velocidad debido a la corriente irruptiva del inducido.
4. Cuando la corriente irruptiva decrece, la tensión en bornes de HC 3 disminuye o suficiente, con el tiempo, para hacer su contrabobina 3A cierre sus contactos 3A n.a. El motor se acelera a la velocidad normal con su circuito de inducido a plena tensión. Un contacto contra el exceso de velocidad OS, n.c., en la línea de control 1 evita el embalamiento en el caso de que el motor serie se desconecte de la carga, mecánicamente, o si la carga disminuye sustancialmente.

El arrancador de la figura 4.20 marcha con 4 relés excitados, pero, en comparación con la figura 4.19, no necesita enclavamientos eléctricos en sus circuitos de control, entre los relés individuales. El método por caída de tensión, además proporciona por sí mismo, a los arrancadores de corriente elevada más facilidad que los dispositivos que utilizan relés serie, cuyas bobinas deben soportar la plena corriente de inducido y las transitorias. Obsérvese que todos los arrancadores por limitación de corriente en bucle cerrado de las figuras 4.17 a 4.20 poseen la ventaja de acelerar el motor a su debido tiempo, es decir, cuando la corriente irruptiva ha disminuido a un valor normal. En cargas muy fuertes con mucha inercia, empleara algo más de tiempo antes de que el motor pueda acelerarse, y la corriente disminuirá lentamente en cada punto. A diferencia de los tipos de arrancador en bucle abierto, de tiempo definido, estos arrancadores son capaces de sensibilizar la carga y modificar su secuencia de tiempo para adecuar las condiciones de carga, utilizando la irrupción de la corriente de inducido como de la carga.

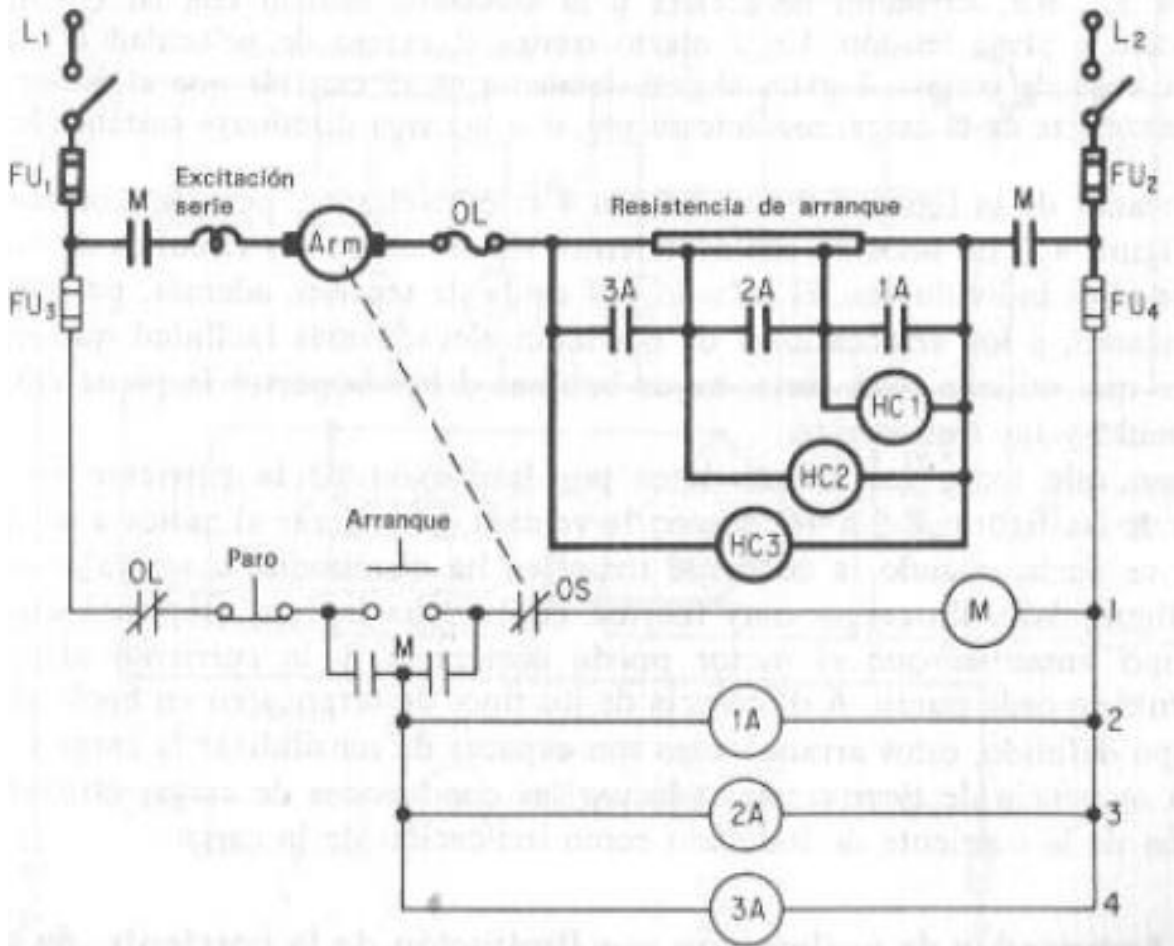


Fig. 4.20 Aceleración por limitación de corriente empleando bobinas de retención (método de caída de tensión)

4.2.10 Arrancador de aceleración por limitación de la corriente, de c.a., que emplea bobinas de retención y amplificador magnético.

Los amplificadores magnéticos también se han utilizado en los circuitos de arranque y de control para amplificar los impulsos de corriente sensibilizados y suministrar la potencia para hacer funcionar los relés diferenciales. La figura 4.21 muestra la tensión de salida en bornes del devanado compensador o polo de conmutación x-x', de un motor shunt. En el caso de motores serie o compound esta salida puede hacerse en bornes excitación serie.

Cuando la corriente irruptiva es elevada, la tensión de salida en los bornes del elemento serie es alta. Esta salida sensibilizada, se conecta a la excitación o devanado de control de un amplificador magnético de c.c. (o devanado de saturación) que está conectado a una fuente de c.a. Cuando el devanado de control satura el núcleo, la inductancia diferencial del amplificador magnético es grande. Recíprocamente, cuando la excitación de control, de c.c. es baja o nula la autoinducción y reactancia de los devanados serie son elevadas, y la salida de c.a. es baja. Un rectificador a base de semiconductores (Si o Ge) de onda completa transforma la salida de c.a. En continua, para excitar las bobinas de



retención de los relés diferenciales en paralelo, de la figura 4.21. Las bobinas de retención de la figura 4.21 son similares a las de la figura 4.20 y funcionan en la secuencia creada por los diferentes valores de la tensión de c.c. por tanto, el circuito de control es idéntico al mostrado en la figura 4.20. El arrancador de la figura 4.21 funciona como sigue:

1. El motor arranca con la máxima resistencia en serie con la del inducido y máxima corriente transitoria a través del circuito del inducido. La elevada tensión de entrada, de c.c., en el amplificador magnético produce una elevada tensión de salida, de c.c., en bornes de todas las bobinas de retención, manteniendo abiertos los contactos 1A, 2A y 3A. Cuando la corriente irruptiva disminuye, la bobina de retención mas debilidad, 1HC, no puede retener su armadura por más tiempo y el relé diferencial 1A cierra los contactos 1A. El relé diferencial 1A es el relé más robusto por que tiene la mayor tensión aplicada en sus bornes.
2. Cuando el relé 1A funciona, simultáneamente cortocircuita un contacto de la resistencia en serie del inducido y abre un contacto 1A n.c. en serie con 1HC, con lo cual evita que 1HC sensibilice los impulsos de corriente. Cuando 1A cortocircuita la resistencia en serie del inducido, la tensión diferencial en bornes del relé 1A es la misma que la tensión de inducido; pero como su contrabobina esta desconectada, el relé 1A permanece excitado.
3. La corriente transitoria que se origina al cortocircuitar un contacto de la resistencia en serie se acelera el motor y proporciona una elevada tensión de salida de c.c. del amplificador magnético a las bobinas de retención 2HC y 3HC. A medida que la corriente irruptiva disminuye, puesto que la tensión en bornes de 2A supera a la de 3A , el relé diferencial 2A cerrara antes que 3A siempre que la tensión en x-x' disminuya a un valor inferior. Cuando 2A cierra, cortocircuita la resistencia adicional del circuito del inducido y abre sus contactos n.c. en serie con 2HC. Las bobinas del relé 1A y 2A están ahora en paralelo con el inducido.
4. Cuando el relé 2A funciona, la corriente irrumpe de nuevo, bloqueando el relé 3A por la acción de 3HC, por ultimo con todo, la corriente desciende a un valor normal y 3A prevalece sobre 3HC. El motor se acelera a su velocidad normal con el inducido a plena tensión.

El arrancador de amplificador magnético mostrado en la figura 4.21 funciona en la posición de marcha con todas sus bobinas del relé de cierre, 1A, 2A y 3A, conectadas en paralelo con el inducido, y con las bobinas diferenciales limitadoras (HC) en bornes de salida E_{cc} en circuito abierto del amplificador magnético. Por tanto, las cargas transitorias o cambios de control de la velocidad no afectaran al funcionamiento del motor sino durante el periodo de arranque.

El circuito del amplificador magnético de la figura 4.21 también tiene la ventaja de



detectar relativamente pequeñas variaciones de la corriente del inducido y transformarlas en tensiones que pueden emplearse para hacer funcionar relés diferenciales. El arrancador puede ser utilizado con las mínimas modificaciones de relés en una amplia gama de motores, debido a que ambas bobinas de cada relé diferencial son bobinas de tensión en vez de corriente. Una segunda ventaja del arrancador está en la respuesta, relativamente rápida, del amplificador magnético a los cambios de saturación (responde en unos cinco ciclos de un circuito de 60 HZ, o en 1/12 s). El propio amplificador, comparado con los amplificadores electrónicos de c.a. que tienen etapas moduladoras y demoduladoras de entrada y de salida, de c.c., es relativamente sencillo, insensible a choques o vibraciones, eléctricamente robusto y además no necesita más mantenimiento que un transformador ordinario. Puede utilizarse para el arranque en c.a. y para el control de la velocidad de motores de c.c. y de c.a., así como en aplicación de servomecanismos.

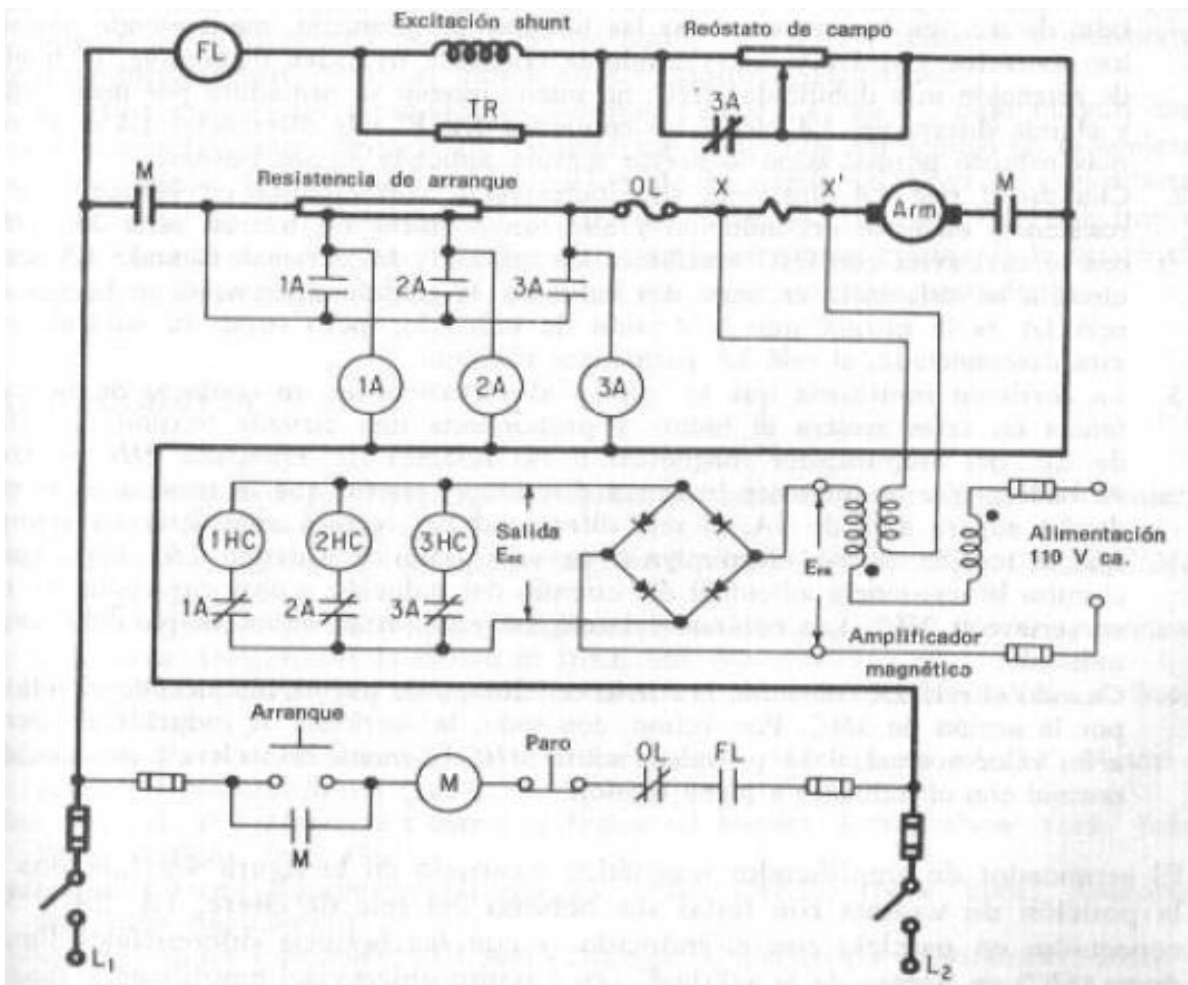


Fig. 4.21 Aceleración por limitación de corriente empleando un amplificador magnético y bobinas de retención para poner en marcha un motor shunt de c.c.

4.3.1 Arrancadores automáticos de c.a.

Los arrancadores automáticos de motores de c.a.. En general, puede decirse que la mayoría de ellos son del tipo en bucle abierto (en vez de en bucle cerrado) ,



empleando aceleración en tiempo fijo. La mayor parte de arrancadores de motores de c.a. Que funcionan bajo los mismos principios que los relés de c.c. Sin embargo los arrancadores de motores de gran potencia emplean uno o más grupos de rectificadores en puente (silicio, germanio o selenio) y utilizan contactares de control y de aceleración de c.c., que tienen la ventaja de una mayor solidez y cierre magnético más seguro, con menor tendencia a la vibración. Además, la utilización de relés de c.c. en el circuito de control, permite la aplicación de constantes de tiempo inductivas y capacitivas para posibilitar un adecuado retardo, así como dispositivos tales como ignitrones y rectificadores controlados de silicio.

Además de la utilización de c.c. en los circuitos de control, también es costumbre emplear tensión reducida para los circuitos de mando de máquinas de c.a. de tensión más elevada. Los arrancadores para motores de c.a. tanto monofásico como polifásicos, que tienen tensiones nominales de 220v o más, suelen usar transformadores para conseguir una tensión inferior (generalmente 115V) para los circuitos de control de c.a. o de c.c. Los que utilizan una tensión inferior se denominan arrancadores de tensión de control reducida; los que utilizan corriente continua se denominan arrancadores de circuito de control de c.c.

Se pueden emplear diversos tipos de arrancadores de tiempo definido para el arranque de motores mono y polifásicos, en las tres clasificaciones generales de arranque a plena tensión o en bornes de la red, arranque a plena tensión en bornes de la red, arranque a tensión reducida y arranque por devanado parcial. No es posible examinar los arrancadores de motores de inducción polifásicos sin considerar las diversas clases de motores de inducción de jaula (SCIMs) basados en el par y la corriente en el arranque.

4.3.2 Arrancador magnético automático a plena tensión.

Un arrancador automático a plena tensión, que utiliza tensión de control reducida, se muestra en la figura 4.22. Los arrancadores de este tipo se pueden conseguir en las graduaciones que han sido normalizadas por las especificaciones NEMA.

Los arrancadores NEMA catalogados en la tabla 26 se pueden obtener con una variedad de protecciones: contra cuerpos extraños, impermeables, resistente a explosiones, etc., y se acostumbra a especificar la envuelta del arrancador junto con el tamaño NEMA, y la tensión de línea y potencia del motor.

En su forma sencilla, los arrancadores NEMA llevan un contactor magnético tripolar M, con un contacto auxiliar M y dos relés de sobrecarga y sus respectivos contactos como se muestra en la figura 4.22. El transformador reductor es opcional y se emplea exclusivamente en motores de tensión elevada. Los pulsadores de arranque y paro generalmente van separados del conjunto pero pueden montarse en su envuelta. A veces se incluye una reconexión manual en ciertos tipos de relés de sobrecarga, y se sitúa en la envuelta protectora. El funcionamiento del arrancador a plena tensión mostrado en la figura 4.22 es el siguiente:

1. Pulsando el botón de arranque en el circuito de tensión de control reducida se excita el contactor M, relé de c.a. que inmediatamente sitúa el motor de c.a. a plena tensión.



2. El motor se parara por una de las siguientes causas:
 - a) Apertura del disyuntor de la línea.
 - b) Un corto circuito en la línea de potencia de alta tensión.
 - c) Un cortocircuito en el circuito de control de c.a. de 115V, que haga saltar los fusibles FU1,FU2.
 - d) Una sobrecarga en el circuito de potencia que hace que los relés inductivos o térmicos disparen los contactos n.c. del relé OL.
 - e) Pulsando el botón de paro n.c.
 - f) Una reducción temporal o falta de tensión suficiente para desexcitar la bobina del relé M en el circuito de control.

Puede observarse, por lo indicado anteriormente que a pesar de la simplicidad de su proyecto, el arrancador automático sencillo a plena tensión va provisto de una buena protección.

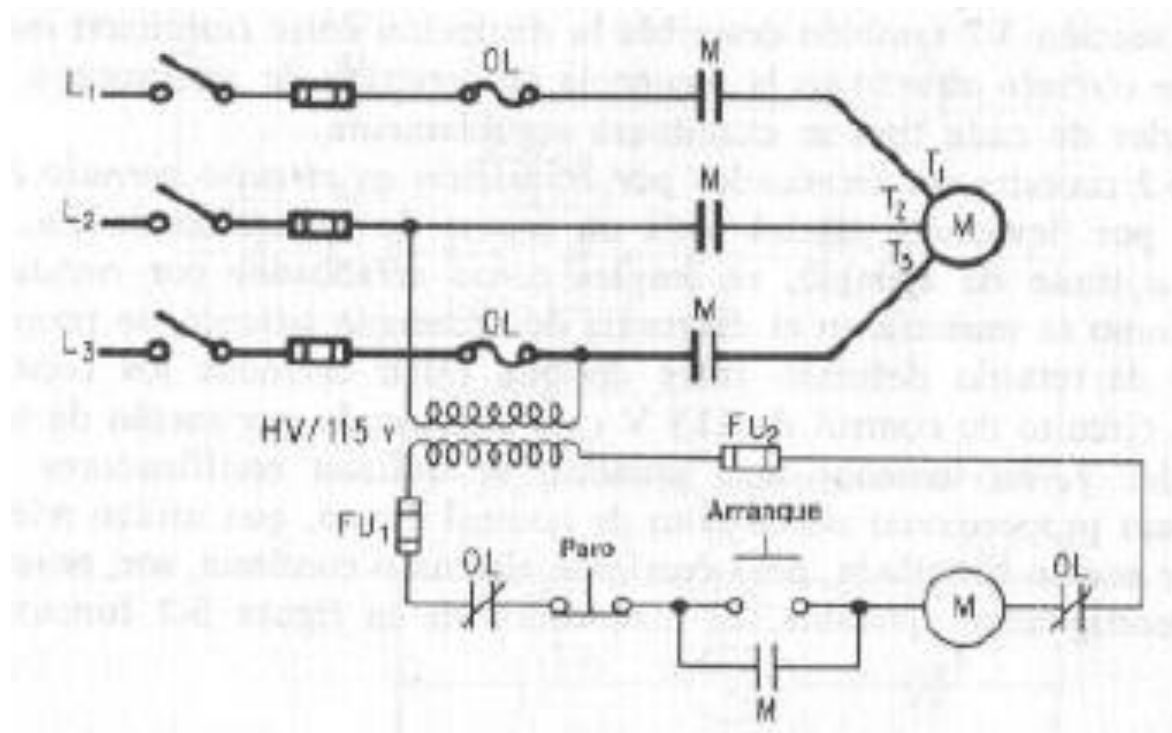


Fig.4.22 Arrancador automático a plena tensión.



NÚMERO DE TAMAÑO NEMA	8 horas Valor nominal de la corriente del contactor (A)	POTENCIA CORRESPONDIENTE A LAS TENSIONES DE LINEA INDICADAS		
		110-V, Trifásico (HP)	220-V, Trifásico (HP)	440/550-V, Trifásico (HP)
00	9	0	1,5	2
0	18	2	3,0	5
1	27	3	7,5	10
2	45	—	15	25
3	90	—	30	50
4	135	—	50	100
5	270	—	100	200
6	540	—	200	400
7	810	—	300	600
8	1215	—	450	900
9	2250	—	800	1600

Tabla 26 Valores nominales de arrancadores nema a plena tensión.

4.3.3 Arrancadores automáticos de aceleración de tiempo fijo de tensión reducida, de c.a.

En aquellos casos en que la energía de la fuente permite, incluso pueden ponerse en marcha motores de inducción extra grandes, automáticamente a plena tensión sin perjudicar el motor. Sin embargo, cuando el flujo de corriente en el arranque produce reducciones momentáneas de la tensión que afectan a otros dispositivos eléctricos o electrónicos, se requiere algún método de arranque por tensión reducida.

La figura 4.23 muestra un arrancador por transición en circuito cerrado a tensión reducida o por devanado parcial para un motor de inducción de c.a. En este caso, solo a título de ejemplo se emplea como arrancador por resistencia del primario. Como se muestra en el diagrama de secuencia adjunto, se proporcionan tres etapas de retardo definido antes que estén cerrados los contactos de marcha. el circuito de control de 115 V esta alimentado por medio de su propio transformador y en tamaños más grandes se utilizan rectificadores de onda completa para proporcionar un circuito de control de c.c. que utiliza relés de c.c. Los relés de acción retardada, para corriente alterna o continua, son generalmente del tipo amortiguador ajustable. El arrancador de la figura 4.23 funciona como sigue:

1. Pulsando el botón de arranque se excitan los contactos principales y auxiliares S en los circuitos de potencia y de control, respectivamente. El motor se pone en marcha a tensión y corriente del primario reducidas.



2. El relé de amortiguador de acción retardada , de c.a., TD_1 , excitado por medio de los contactos S n.a. y de los TD_3 , n.c., empieza a trasladar su armadura a la posición cerrada. Después de un adecuado retardo, el relé TD_1 cierra sus contactos TD_1 n.a. excitando el relé de acción retardada TD_2 .
3. TD_2 también proporciona un retraso antes de que, a su vez, excite el relé TD_3 por medio de los contactos TD_2 n.a. y los contactos R, n.c. Cuando, después de un adecuado retardo, TD_3 cierra, excita el contactor de la línea, R.
4. Cuando se cierra el contactor R de la línea, de c.c. o de c.a., cortocircuita la resistencia de arranque del primario (en este caso), dando origen a un segundo y más pequeño flujo de corriente a medida que el motor se va llevando a plena tensión. Al mismo tiempo, los contactos auxiliares de R desexcitan todos los relés de acción retardada. Solo los relés S y R quedan excitados por medio de sus contactos auxiliares de enclavamiento.

Las ventajas de la figura 4.23 son:

1. Proporcionan la transición en el circuito cerrado de arranque a marcha donde esta se requiera, como queda puesto de manifiesto en la tabla de secuencia de contactos de la figura 4.23.
2. Cada uno de los relés de acción retardada es ajustable dentro de unos límites para proporcionar un buen margen de ajuste por el que pueda obtenerse el retraso para acomodarlo a las necesidades de arranque establecidas por la naturaleza de la carga del motor y de los conductores que lo alimentan.
3. Solo están excitados 2 relés durante el periodo de marcha.
4. Solo pueden incluirse los relés de acción retardada adicionales en el circuito de control para obtener mayores retrasos si fuera necesario.
5. En el mismo arrancador puede utilizarse igualmente bien mediante resistencia del primario, reactancia, autotransformador, y devanado parcial para una potencia nominal dada, dependiendo, como se indicó de la magnitud de los contactos de la línea, de la tensión y del servicio.
6. El mismo arrancador puede utilizarse para motores de inducción de diversos valores nominales de la tensión, sustituyendo el transformador del circuito de control.
7. Para algunos de los valores nominales grandes de la potencia, los transformadores de corriente, también pueden con bobinas de sobrecarga y contactos de la misma magnitud puesto que estos funcionan solo en el circuito de control, simplificando extraordinariamente las partes que se necesitan para la fabricación de arrancadores de diversos regímenes nominales.



La figura 4.24 muestra solamente el circuito de control y la secuencia de contactos para un arrancador básico de c.a. de transición en circuito abierto del tipo de aceleración de tiempo definido (en bucle abierto). El circuito mostrado tiene relés de control de c.c (aunque también podían utilizarse relés de c.a. en regímenes nominales más pequeños) excitados por medio de un rectificador de onda completa desde el transformador del circuito de control de tensión reducida. El circuito también permite un grupo separado de contactos principales y auxiliares M para ser excitados (además de un grupo de contactos de arranque S de marcha R), si los precisara la transición de conmutación. el arrancador va provisto de enclavamientos mecánicos y eléctricos para asegurar la transición en circuito abierto (generalmente un requisito en el arranque sencillo por estrella-triángulo y en algunos tipos de arranque por autotransformador), aunque puedan aplicarse en los esquemas de circuito y resistencias de protección para salvar los inconvenientes de este tipo de transición. El funcionamiento del arrancador de la figura 4.24 es como sigue:

1. Pulsando el botón de arranque se excita el contactor de la línea M y sus contactos auxiliares en el circuito de control, así como el relé temporizado TR.
2. Al excitarse los contactos M también se excita el relé de arranque S por medio de los contactos M, n.a., y los TR, n.c.
3. Después de un adecuado retraso, cada vez que el relé temporizado funciona abre los contactos TR,n.c., en serie con S, y posteriormente cierra los contactos TR, n.a., en serie con R. estos últimos contactos no pueden cerrarse hasta que los primeros estén abiertos.

El arrancador de la figura 4.24 es un arrancador típico de bucle abierto, de aceleración de tiempo fijo para motor de inducción de c.a. Sirve de elementos de control de c.c. con los cuales pueden realizarse variedades de los circuitos de control para el arranque por tensión reducida, estrella-triángulo, auto transformador y devanado parcial, utilizando diversos tipos de dispositivos de acción retardada. Debido a que la mayor parte de estos dispositivos temporizados son mecánicos o electromecánicos, existe un periodo de espera hasta que se hallan reconectado dichos dispositivos. Esto representa un serio inconveniente allí donde puedan ocurrir frecuentes arranques paradas e inversiones. Los dispositivos temporizados eléctricos, y los relés que utilicen una constante de tipo inductiva y capacitiva, son susceptibles de reconexiones más rápidas y de un ajuste limitado de la constante de tiempo para originar el retraso necesario.

Obsérvese que los relés de sujeción y fijación S y R aseguran la transición en circuito abierto. Un relé de sujeción tiene dos bobinas: una cierra un grupo de contactos, la otra lo abre. Cuando el relé cierra, funciona un sujetado para cerrar el relé y mantenerlo en posición cerrada, incluso si un relé falla. Por tanto, cuando S esta excitado, todos los contactos S (no mostrados) están cerrados y abiertos todos los R. análogamente, cuando R esta excitado, todos los contactos R están cerrados y abiertos todos los S. Esta cualidad del relé se reproduce en la conexión estática por memoria retentiva.

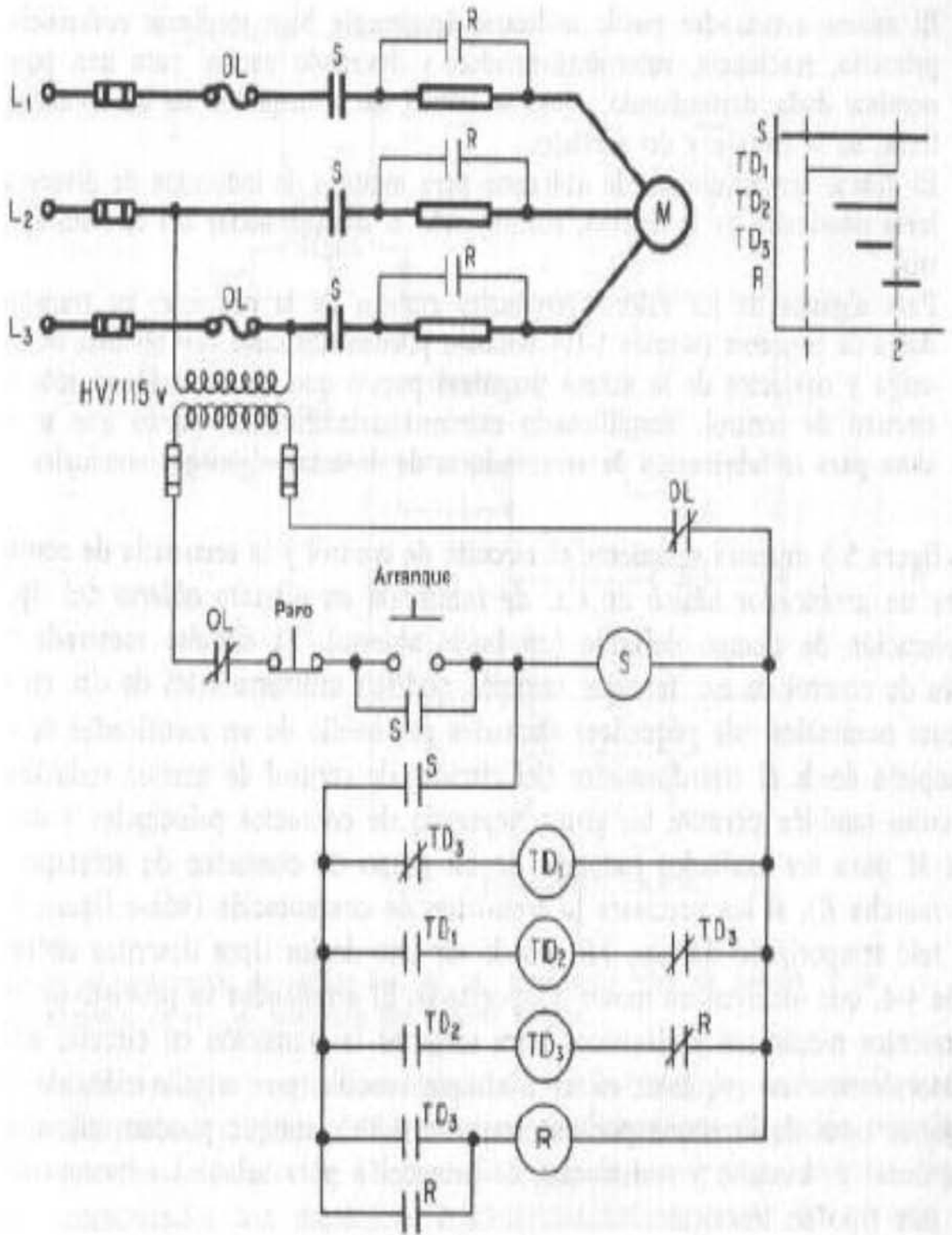


Fig.4.23 Aceleración de tiempo fijo empleando relés de acción retardada en transición por circuito cerrado.

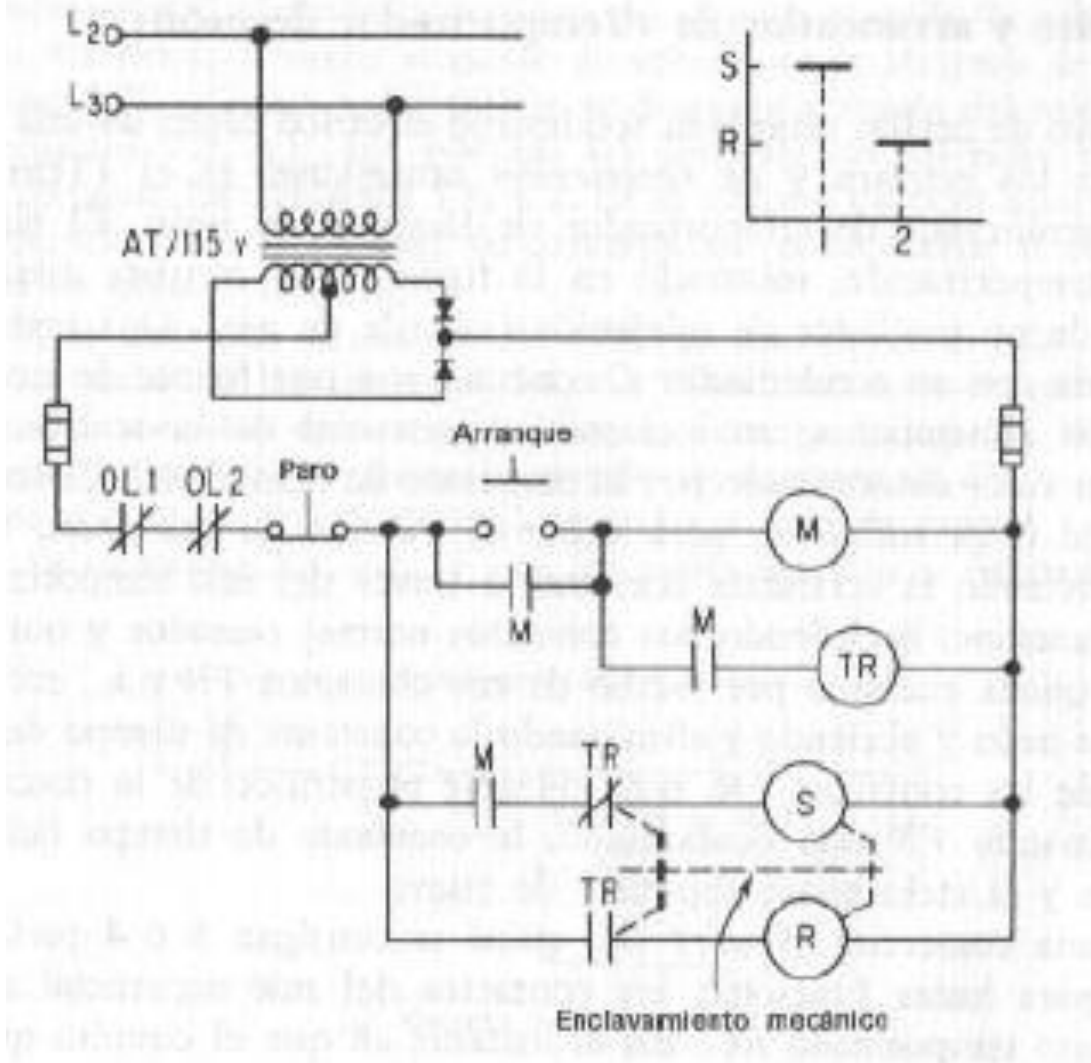


Fig.4.24 Arrancador de aceleración de tiempo fijo, de c.a., empleando relés de sujeción y de acción retardada, de c.c. en transición por circuito abierto.

4.3.4 Circuito arrancador de temporizador de neón.

Un dispositivo de acción retardada totalmente eléctrico capaz de una amplia gama de ajuste de los retrasos y de reconexión instantánea es el temporizador de neón o arrancador de temporizador de lámpara de neón. El circuito fundamental de temporización mostrado en la figura 4.25a, consiste esencialmente en un circuito de un oscilador de relajación (válvula de gas). una resistencia variable R en serie con un condensador C conectados a una fuente de c.c., desarrollan cuando esta alimentados, un aumento exponencial de la tensión del condensador C a un valor determinado por la constante de tiempo RC . Cuando la tensión en bornes C es suficiente para cebar la válvula de gas neón, la válvula se enciende enviando la suficiente corriente a través del relé temporizado TR para hacer que funcione, invirtiendo sus contactos normales abiertos. El relé TR queda excitado por medio de sus contactos TR n.a., cortocircuitando la válvula de neón y abriendo y



eliminando la constante de tiempo de circuito RC por medio de los contactos TR, n.c., durante el periodo de la descarga del condensador. cuando TR esta desexcitado la constante del tiempo del circuito RC se restablece y el ciclo puede repetirse de nuevo.

En el esquema comercial (Square D), quizá consigan 3 o 4 periodos de temporización para hacer funcionar los contactos del relé secuencial empleando el mismo circuito temporizado RC. En el instante en que el circuito queda desexcitado, todos los relés vuelven a su estado normal.

Una versión más simple de la aceleración por temporizador de neón se muestra en la figura 4.25b. El circuito agrupa la aceleración de tiempo definido y por limitación de la corriente mediante circuitos de transformadores de corriente y de tensión, respectivamente. En ambos circuitos se utilizan rectificadores de onda completa para hacer posible el enclavamiento entre el circuito de corriente de carga y el circuito temporizado de tensión. Un circuito de control de c.a., con relés de c.a. gobernados por el circuito de mando de c.c., proporciona dos etapas de aceleración por mediación de los relés de aceleración 2A y 1A, respectivamente, que se accionan en secuencia de la siguiente manera:

1. Cuando se pulsa el botón de arranque (que no se muestra) y los contactos M (que tampoco se muestran) se cierran, el motor de inducción se pone en marcha a través de la plena resistencia o reactancia del primario en serie con el estator (que tampoco se muestra).
2. La constante de tiempo RC que gobierna el encendido de la lámpara de neón es función del ajuste de la resistencia R_1 y del ajuste de temporización R_2 en serie con el condensador C. cuando la corriente de la carga es elevada, la c.d.t. en R_1 y R_2 es elevada tendiendo a varia el punto cebado de la lámpara de neón.
3. El condensador C se carga y por último se descarga a través del relé TR, abriendo los contactos TR, n.c. que pontean los circuitos de corriente y de tensión de c.c., y cerrando los contactos TR n.a. en el circuito de relés de c.a TR queda excitado durante todo el periodo de descarga del condensador C por medio de la lámpara de neón.
4. Cuando TR se cierra en el circuito de relés de c.a., excita el relé de control 3 de c.a., por medio de los contactos 1A, n.c. El último se mantiene cerrado por mediación del contacto de enclavamiento 3 durante el espacio de tiempo en que TR está excitado (la constante de tiempo de descarga C).
5. Excitado el relé de control 3, de c.a., se excita el relé de control 1, de c.a., por medio de los contactos 1A, n.c., y por los contactos 3, n.a. Excitado el relé de control 1, ahora se autoexcita por el relé 1A, a través de su contacto n.a. 1.
6. Cuando el relé de aceleración 1A esta excitado, cortocircuita un contacto de la resistencia o reactancia del primario en serie con el estator (que no se muestran), o sitúa un devanado parcial en paralelo (que tampoco se muestra).



7. La operación del circuito de relés de control de c.a. cesa cuando los relés 1A y 1 están excitados y los relés de control 2 y 3 desexcitados. Además, y por último los contactos TR n.a., vuelven a su estado n.a. cuando termina la descarga de C y TR esta desexcitado, acoplado los circuitos de corriente y de tensión por mediación del TR, n.c.
8. La onda irruptiva de corriente producida por los contactos cortocircuitados 1A en el circuito de potencia, recicla una vez más el circuito de potencia, recicla una vez más el circuito de constante de tiempo RC y produce el retardo necesario antes que se cargue C. Cuando la lámpara neón se enciende por segunda vez, el relé temporizador TR vuelve a ser excitado, y de nuevo se acciona el circuito de relés de c.a.
9. Esta vez, el relé 2 es excitado a través de los contactos 1A n.a y los contactos 3, n.c. El relé de aceleración cortocircuita el último contacto de la resistencia o reactancia del primario, situando el motor en la posición de marcha. A la vez, 2A desexcita el secundario del circuito del transformador de tensión, de forma que cesan todas las ulteriores operaciones de temporización de la constante de tiempo RC. Los relés de control 1 y 2 en el circuito de c.a. y los contactores de aceleración de la línea 1A y 2A, permanecen excitados en la posición de marcha.

Las ventajas del temporizador de neón son:

- Operación en transición cerrada (1A esta excitado durante el intervalo de tiempo en que 2A entra en funcionamiento).
- Reconexión instantánea.
- El circuito permite ajuste (relativamente amplio) de tiempo definido y de limitación de la corriente en el interior de un solo arrancador.
- El circuito puede emplearse para la operación en c.c. así como en c.a.
- No se emplean dispositivos mecánicos temporizados de ningún tipo.
- Pueden sustituirse los componentes fundamentales a un coste relativamente bajo.

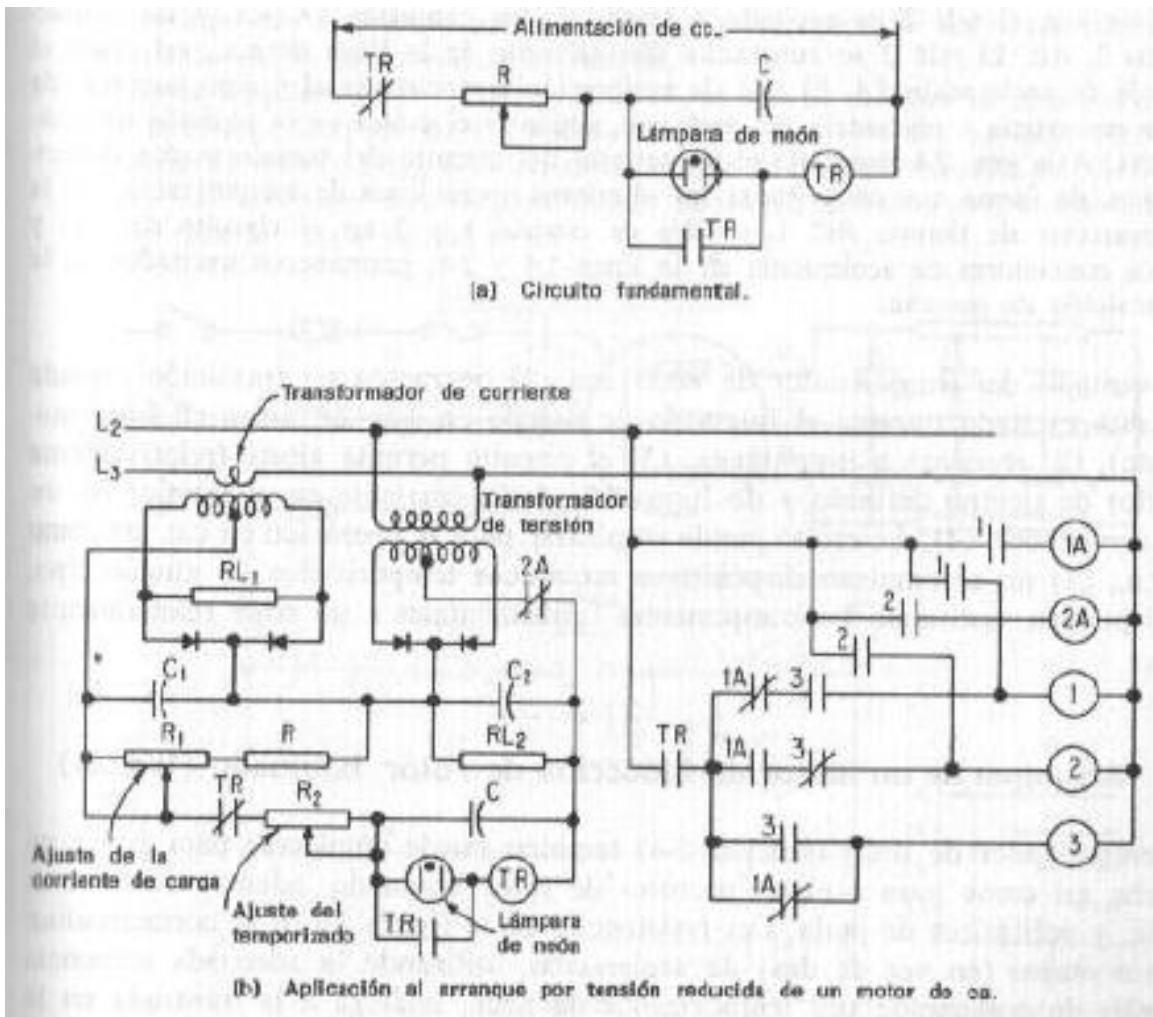


Fig.4.25 Temporizador de lámpara de neón combinando aceleración por limitación de la corriente y tiempo definido.

4.3.5 Arranque de un motor de inducción de rotor bobinado (wrim).

El temporizador de neón también puede utilizarse para poner en marcha así como para acelerar motores de rotor bobinado, además de motores de c.c. y polifásicos de jaula.

Utilizando la adecuada secuencia de relés de aceleración por temporizador de neón, mostrada en la figura 4.25, en transición cerrada, con un motor de rotor bobinado. El circuito de relés de la figura 4.23, en que TD_1, TD_2 y TD_3 se excitan en secuencia de retardo definida, también puede usarse con una pequeña modificación para cortocircuitar de una manera más efectiva las resistencias del secundario del rotor. Tal arrancador de retardo definido, mostrado en la figura 4.26, funciona de la siguiente manera:

1. Cuando se pulsa el botón de arranque, el estator del motor del rotor bobinado se excita por mediación de los contactores M. el contacto auxiliar M, que tiene un contacto de retardo M_{td} , excita el relé de acción retardada 1A, de c.a. El motor arranca a plena resistencia del rotor y máximo



deslizamiento en su devanado secundario (por lo que desarrolla el máximo par rotorico y en consecuencia la corriente reducida estatorica para suministrar el par).

2. Después de un intervalo de tiempo preregulado, determinado por M_{td} y el relé de acción retardada 1A, el ultimo cierra cortocircuitando un tercio de la resistencia del rotor conectada en estrella. El relé 1A también cierra su contacto 1A n.a., excitando el relé 2A. El relé 1A también cierra su contacto 1A n.a., excitando el relé 2A. El relé de acción retardada 2A, cierra después de un intervalo de tiempo preregulado, para cortocircuitar un tercio mas de la resistencia del rotor conectada en estrella.
3. El motor adquiere mayor velocidad cada vez que se reducen la resistencia y el deslizamiento. Después de un adecuado retraso, el rele 2A también cierra su contacto $2A_{td}$, n.a., excitando el rele de acción retardada 3A.el ultimo cierra su contactos n.a. después de un adecuado retardo, cortocircuitando de echo toda la resistencia del motor.

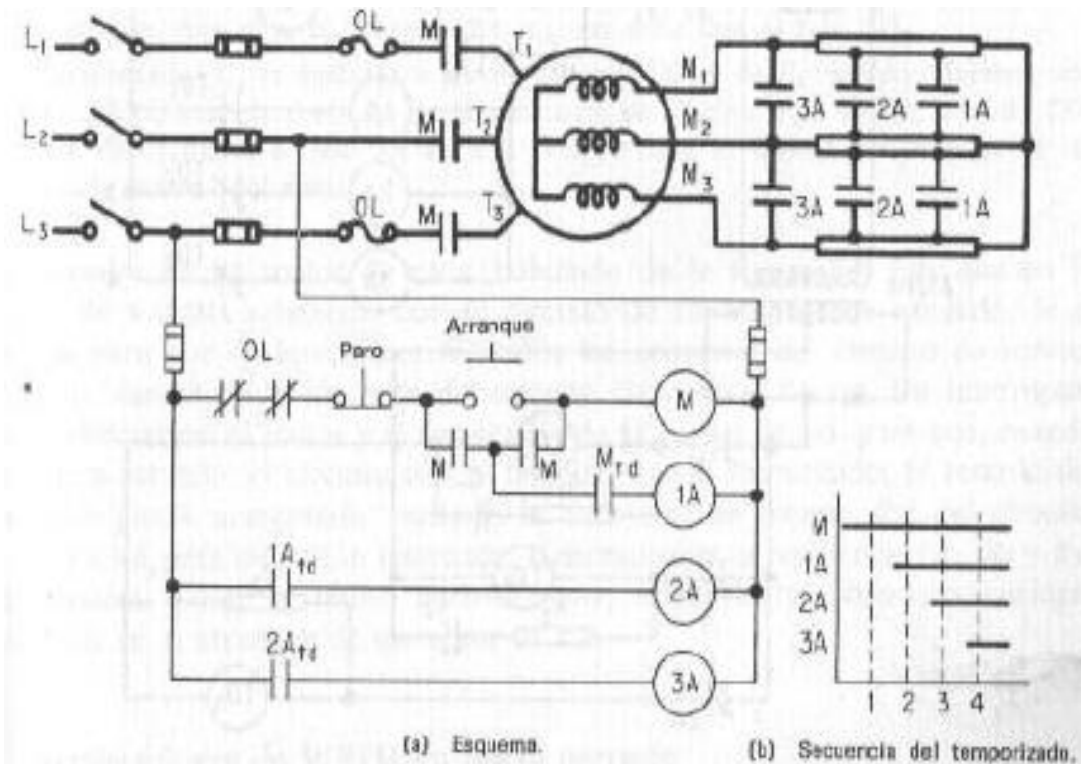


Fig.4.26 Arrancador por resistencia del secundario de un rotor bobinado empleando relés de aceleración de tiempo fijo.

Los relés de acción retardada de c.a. de la figura 4.26 funcionan por transición en circuito cerrado y pueden emplearse para accionar una transición de cuatro etapas en circuito cerrado para cualquier tipo de arranque de motores de c.a. por acción retardada predeterminada, como se muestra en la figura 4.26b.

Otro principio anteriormente mencionado pero no mostrado todavía, se basa en la utilización den relés de descarga de constante de tiempo RC. Este tipo de arranque puede emplearse bien en motores de c,c, o bien de c.a. para



proporcionar una secuencia de transición en circuito cerrado análoga a la de la figura 4.26b. El arrancador cuyo circuito de control (solamente) se muestra en la figura 4.27 y funciona como sigue:

1. Pulsando el botón de arranque se excita el contactor principal M en el circuito estatorico y la línea de control de c.c. esta activado por medio de un rectificador de onda completa y los contactos TD_1, TD_2 y TD_3 en las líneas 2, 3 y 4 están todos abierto, puesto que están excitados sus relés de c.c. En el instante de excitar M , el contacto auxiliar M n.c. (en serie con TD_1 y con el circuito que lo shunta R_1C_1) se abre. Sin embargo, TD_1 no se desexcita inmediatamente porque el condensador cargado C_1 se descarga a través de TD_1 durante la mayor parte del periodo de descarga de la constante del tiempo.
2. Durante el periodo en que M estaba excitado, el motor arranco a plena resistencia del rotor. Después de un adecuado retardo, determinado por la constante de tiempo de la descarga R_1-C_1 , el relé TD_1 esta desexcitado, cerrando el circuito del relé de c.a. para excitar el contactor $1A$, de c.a., en la línea de control 2. El relé $1A$ cortocircuita un tercio de la resistencia del rotor conectada en estrella y simultáneamente abre el circuito al relé TD_2 .
3. El condensador C_3 se descarga a través del relé TD_2 y de R_2 , manteniendo el TD_2 en estado excitado durante la mayor parte del periodo del tiempo de descarga. Finalmente, TD_2 queda desexcitado, cerrando sus contactos en serie con el relé de c.a. $2A$. el relé $2A$ cortocircuita un tercio más de la resistencia rotorica del secundario, haciendo que el motor del rotor bobinado se acelere al reducir la resistencia rotorica y el deslizamiento. A la vez que el relé $2A$ queda desexcitado, este abre el contacto a $2A$ n.c. en serie con el relé TD_3 .
4. El condensador C_3 se descarga a través del relé TD_3 y de R_3 excitado durante una parte del periodo de descarga de la constante del tiempo. Por último, cuando TD_3 queda desexcitado, el relé de c.a. cortocircuita el último contacto de la resistencia externa del rotor.

El arrancador de un motor de rotor bobinado de la figura 4.27 funciona en la posición de marcha solamente con un circuito de control de c.a. excitado. Si el motor se para por cualquier motivo, todos los contactos del circuito de control se cierran, desexcitando los relés del circuito de control de c.a. Un interruptor de línea desconecta el motor y el arrancador de la fuente de c.a. para que cuando estén en servicio, el circuito de c.c. también quede excitado. El retardo del arrancador puede aumentarse variando la constante del tiempo RC del circuito que shunta los relés de acción retardada. Generalmente la resistencia (R_1, R_2 y R_3) se incrementa. Como se indicó anteriormente, en este principio funciona analógicamente bien el arranque de un motor de c.c.

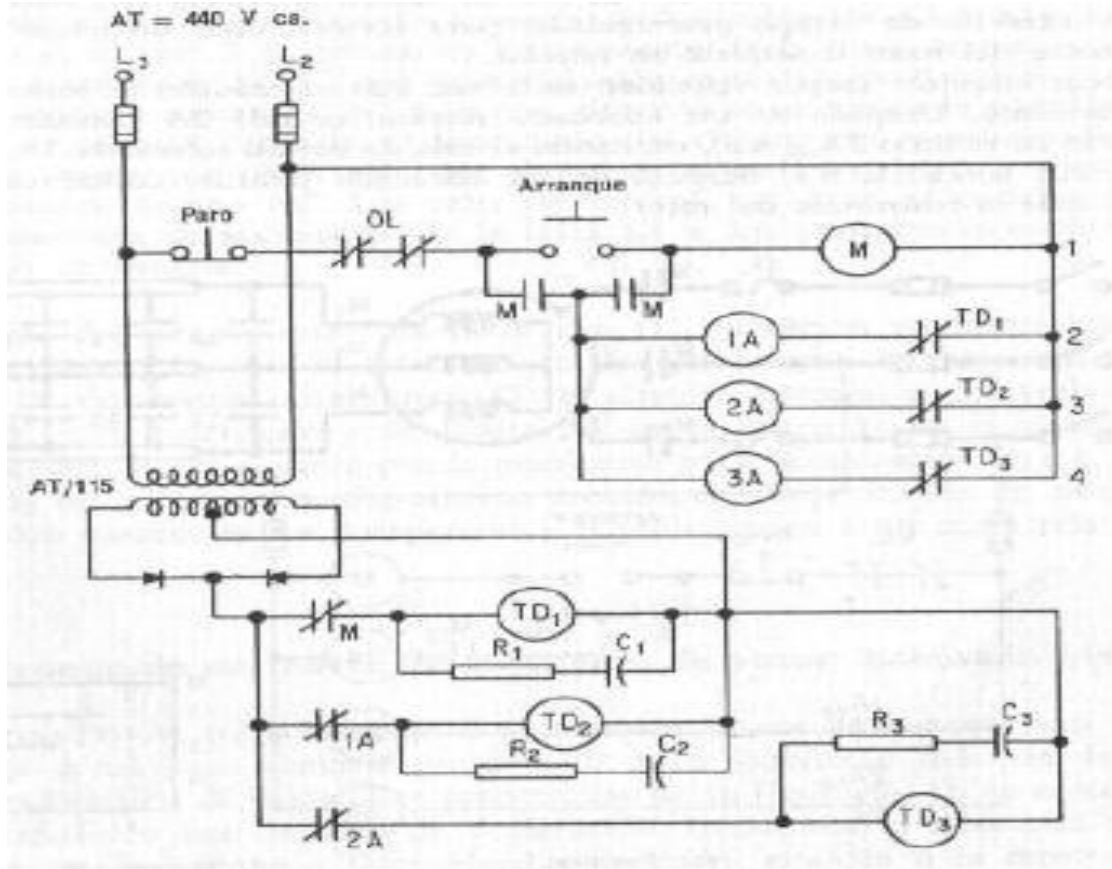


Fig.4.27 Relés de constante de tiempo RC para aceleración de tiempo fijo (motor de rotor bobinado).

4.3.6 Arrancadores de wrim en bucle cerrado.

A excepción del principio del temporizador de neón (que combina limitación de corriente con retardo prefijado), los arrancadores de c.a. analizados anteriormente eran del tipo en bucle abierto. Aunque la mayor parte de dichos arrancadores, que se emplean en motores polifásicos *de jaula* y *de rotor bobinado*, son del tipo de bucle abierto, se ha ideado un grupo de arrancadores basados en los principios de bucle cerrado o realimentación. Un arrancador de este tipo, que emplea relés serie de acción rápida, de c.a., es capaz de sensibilizar y responder a las corrientes transitorias de c.a. originadas en la resistencia del motor durante los periodos de arranque y de aceleración. El relé serie es un tipo de acción rápida, capaz de abrir y cerrar en intervalos de tiempo más cortos que los relés de tensión. La figura 4.28 muestra un arrancador que sirve de *relés serie* de c.a. que funciona de la siguiente manera:

1. Pulsando el botón de ARRANQUE se excita el contactor *M*, poniéndolo en marcha el motor de inducción de rotor bobinado a plena resistencia del rotor en el circuito del secundario. La corriente transitoria en el arranque, a través del relé 1S en el circuito rotorico, es suficiente para desexcitar el relé 1A en la línea de control 2 antes de que tenga posibilidad de funcionar. El motor



se pone en marcha a plena resistencia del rotor y lentamente se acelera al valor de la velocidad determinando por su carga y deslizamiento.

2. El relé 1S no se desexcita hasta que la corriente de punta es lo suficientemente baja para poder hacer que sus poderosos resortes abran los contactos. Dependiendo de la naturaleza de la carga, el tiempo de operación del relé 1S es una variable, y el motor se acelera solamente cuando la onda irruptiva desaparece y se desexcita del relé 1S.
3. *Los contactos desexcitados 1S n.c.* excitan el relé 1A, cortocircuitando el primer elemento de la resistencia del rotor en el circuito del secundario por medio de los contactos 1A n.a. y el relé 2S. el relé de acción rápida 2S abre la línea de control 3 antes de que 2A funcione, y el motor se acelera a un nuevo valor de la velocidad determinada por su carga y deslizamiento.
4. *El relé 2S* no se desexcitan hasta que las corrientes transitorias del rotor son suficientemente reducidas para hacer que sus poderosos resortes hagan función de los contactos de relé 2S. a su debido tiempo, el relé 2S pasa al reposo y excita la línea de control 3 por medio de sus 2S n.c. y 1A n.a.
5. El relé de control excitado 2A, de c.a., acelera de nuevo el motor de rotor bobinado, cortocircuitando sus contactos 2A, n.a. en el circuito rotorico del secundario por medio del relé de baja impedancia 3S. el 3S de acción rápida abre la línea de control 4 antes de que funcione el relé 3A. El motor se acelera hasta que las corrientes transitorias del rotor disminuyan lo suficiente para desexcitar el relé serie 3S de c.a.
6. Desexcitado 3S, se cierra la línea de control 4, excitando el relé 3A y cortocircuitando completamente la resistencia del circuito rotorico. El motor se acelera como un motor de jaula a su deslizamiento nominal o normal, según la carga.

Igual que el arrancador de relés serie, de c.c., por limitación de la corriente el de rotor bobinado, de la c.a., mostrado en la figura 4.28, es virtualmente infalible bajo diversas condiciones de carga con frecuentes paros y arranques. Sin embargo, debido a los contactos de enclavamiento. El mantenimiento puede resultar problemático a medida que los contactos se desgastan y envejecen. El uso de amplificadores magnéticos, para sensibilizar corrientes transitorias del rotor de estator, en combinación con relés diferenciales, elimina los gastos de entretenimiento de los contactos en un arrancador de amplificador magnético de bucle cerrado, de c.a.

Otro principio en el bucle cerrado que puede emplearse en motores de rotor bobinado es el que utiliza relés de control de frecuencia. El relé de control de frecuencia, al ser inductivo, está formado por parte de un circuito resonante serie cuya respuesta en frecuencia se sintoniza por medio de un condensador en serie y cuya respuesta en tensión se ajusta por mediación del condensador en serie y cuya respuesta en tensión se ajusta por mediación de una resistencia conectada



en serie, como se muestra en la figura 4.29. El circuito de relés se conecta a un anillo colector y a una toma en otra línea de la resistencia del rotor. Los relés de control de frecuencia 1F, 2F y 3F están sintonizados de forma que pasaran a la posición de reposo a una frecuencia deseada por debajo de su frecuencia resonante serie. Por ejemplo, el relé 1F es resonante (mínima impedancia) a 60Hz pero se desexcita a 45 Hz; el relé 2F es resonante a 45 Hz pero pasa a la posición de reposo a 30 Hz; el relé 3F lo es a 30 Hz pero se desexcita a 15 Hz. El arrancador en bucle abierto por sensibilización de frecuencia, de la figura 4.29, funciona como sigue:

1. Cuando se pulsa el botón de arranque en el circuito de control del primario (fig.4.29b) el relé M excita el estator y el motor se pone en marcha a plena resistencia rotorica del secundario. El relé 1F, sintonizado a 60 Hz (la frecuencia rotorica en reposo), abre los contactos 1F n.c. en el circuito de control del primario. El motor se acelera a plena resistencia rotorica desde su deslizamiento de 100 por ciento en reposo a uno inferior. A medida que el motor se acelera irrumpe la corriente y disminuye la frecuencia rotorica. A una frecuencia rotorica de 45 Hz, el relé 2F abre sus contactos n.c. y el 1F cierra su n.c. en el circuito de control del primario, pasando a este último a la posición de reposo a su frecuencia de resonancia de desconexión.
2. Excitado el relé 1A, cierra sus contactos en el circuito secundario del motor, cortocircuitando un elemento de la resistencia rotorica. La corriente rotorica aumenta y se desarrolla un par para acelerar el motor a un deslizamiento más pequeño y a menor frecuencia rotorica.
3. A medida que el motor gana velocidad la corriente aumenta, y su frecuencia disminuye a 30 Hz. A esta frecuencia el relé 2F pasa al reposo en cambio el relé 3F es excitado. El relé de control 2A se excita en el circuito de control del primario por medio de los contactos del relé 2F n.c. y los n.a. del relé excitado 1. Excitado el relé 2A, cierra sus contactos en el circuito del secundario del rotor cortocircuitando un segundo elemento de la resistencia del motor. La corriente rotorica aumenta y se origina un par para acelerar el motor a deslizamiento más pequeño y menor frecuencia rotorica.
4. El motor gana velocidad una vez más a medida que la corriente aumenta y su frecuencia disminuye a 15Hz. A esta frecuencia el relé 3F pasa al reposo, excitando el relé 3A en el circuito del control primario. el relé 3A cortocircuitando el último contacto de la resistencia del rotor, y el motor se acelera a su deslizamiento menor (menor del 5 por ciento) y frecuencia rotorica nominales (por debajo de 3Hz).

Resulta sencillo sintonizar o ajustar los relés de control de frecuencia así como la tensión a la que pasaran al reposo. Además, de la ventaja de un control de bucle cerrado se logra sensibilizando la frecuencia en vez de la corriente. Por tanto si la inercia de la carga es grande y la carga aplicada fuerte, la frecuencia rotorica será mayor para periodos más largos y el motor no se acelerara tan rápidamente.



Recíprocamente si el motor marcha en vacío, la aceleración es relativamente rápida por que la frecuencia disminuye rápidamente.

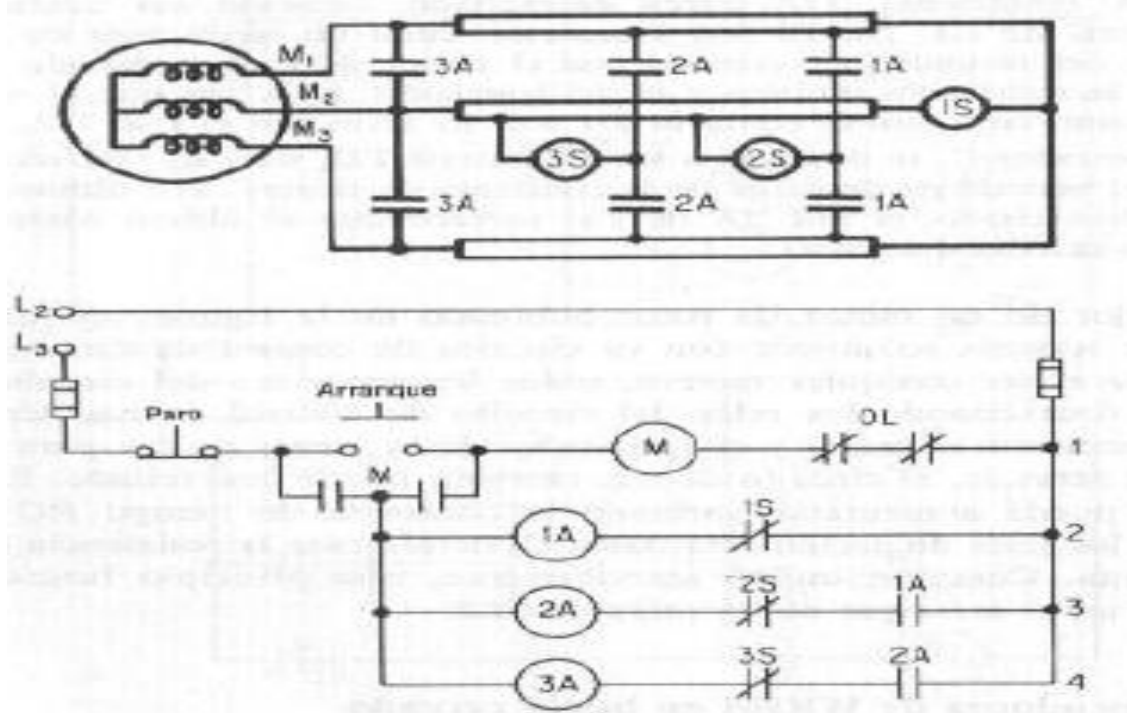


Fig.4.28 Arrancador de aceleración por limitación de la corriente de rotor bobinado, utilizando relés de serie de c.a.

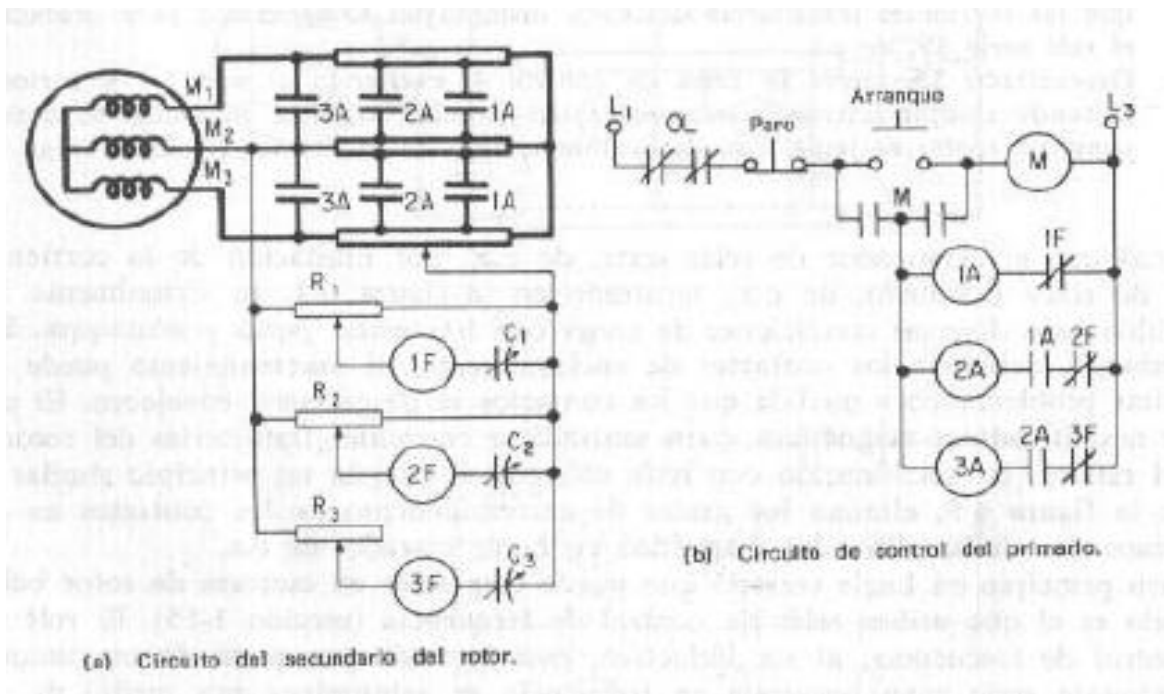


Fig. 4.29 Aceleración de un motor de rotor bobinado que se basa en la frecuencia rotorica empleando relés de frecuencia.



4.3.7 Arrancadores automáticos para motores síncronos.

Puesto que el estator de un motor síncrono es el mismo que el de un motor de inducción, el motor síncrono polifásico puede ser puesto en marcha como un motor de inducción con sus devanados amortiguadores mediante uno de los métodos de arranque automático por primario de un motor de inducción, de c.a.

En todos los métodos de arranque por el estator, no obstante, es costumbre cortocircuitar la excitación de c.c. durante el periodo de arranque hasta que el rotor este cerca de la velocidad de sincronismo. A esta velocidad (determinada por la frecuencia rotorica inducida en el devanado de excitación) el circuito de excitación puede abrirse automáticamente mediante un relé de control de la frecuencia, y la tensión continua puede aplicarse a la excitación para permitir que lo lleve al sincronismo, como un motor síncrono.

Un arrancador típico que utiliza relés de frecuencia polarizados, se muestra en la figura 4.30. El circuito de arranque estatorico del primario se ha simplificado para destacarlo y mostrar el arrancador a plena tensión. El arrancador de un motor síncrono de la figura 4.30 funciona de la siguiente manera:

1. Pulsando el botón de arranque, se excita el relé de control de acción rápida 1A, que es lo suficientemente rápido para excitar F_2 en el circuito de la fuente de c.c. (desexcitando el relé 2A) antes de que el contactor principal M, de c.a., y su contacto auxiliar M puedan cerrar el relé 2A. Por tanto, el motor arranca como uno de inducción a plena tensión con el devanado de excitación $f_1 - f_1$ cortocircuitado por la bobina del relé F_1 de frecuencia polarizada de baja resistencia, una resistencia de tirite TR, y la bobina del relé 2A, n.a.
2. El relé $f_1 - f_1$ es un relé de frecuencia polarizado que tiene dos devanados en oposición. Durante el periodo de arranque, la frecuencia inducida en el devanado de excitación altamente inductivo $f_1 - f_2$ es elevada y como la inductancia de la bobina X_L también lo es, la mayor parte de la corriente de excitación inducida, que fluye de la bobina F_1 se polariza en oposición a F_2 por lo que mantiene abierto el contacto F_2 , n.c.
3. A medida que el motor se acelera, la frecuencia inducida en el devanado de excitación $f_1 - f_2$ disminuye, haciendo que se derive más y más la corriente inducida de c.a. a la bobina de reactancia X_L , que tiene una resistencia inferior a la bobina del relé F_1 . A una frecuencia próxima a la del sincronismo, la bobina X_L literalmente cortocircuita la bobina F_1 .
4. El relé de frecuencia polarizado hace que funcione la bobina F_2 que cierra el contacto n.c. en serie con el relé de control 2A. Excitado el relé de control 2A, conecta la excitación a la fuente de c.c. y simultáneamente quita el cortocircuito entre los devanados de excitación para permitir que el reóstato de campo (y la baja resistencia de X_L a la c.c) se conecte en serie con la excitación. El montaje del reóstato de campo se ajusta generalmente



al valor cercano al factor de potencia unidad e excitación del motor síncrono.

El relé de sincronismo de frecuencia polarizado está proyectado de tal forma que cierra el circuito del relé 2A en un punto en el que la onda inducida de c.a. en la bobina F_1 es más favorable al sincronismo, es decir, cuando un polo sur del rotor gira casi en sincronismo con un polo norte de un campo magnético giratorio. Si el motor síncrono está descalado un polo, o si ocurre una sobrecarga durante el periodo de arranque, la frecuencia inducida en la bobina F_1 es tal que mantiene al contacto $F_1(F_2)$ abierto en serie con el relé de control A. el relé de frecuencia polarizado o de sincronismo funciona, por tanto, como un transductor de frecuencia, y sincroniza el motor síncrono en el momento adecuado para el sincronismo en vez de a un intervalo de tiempo definido predeterminado. Otros métodos de sincronización que funcionan con relés de factor de potencia con sensores de corriente de línea, de c.a., también se emplean para arrancadores

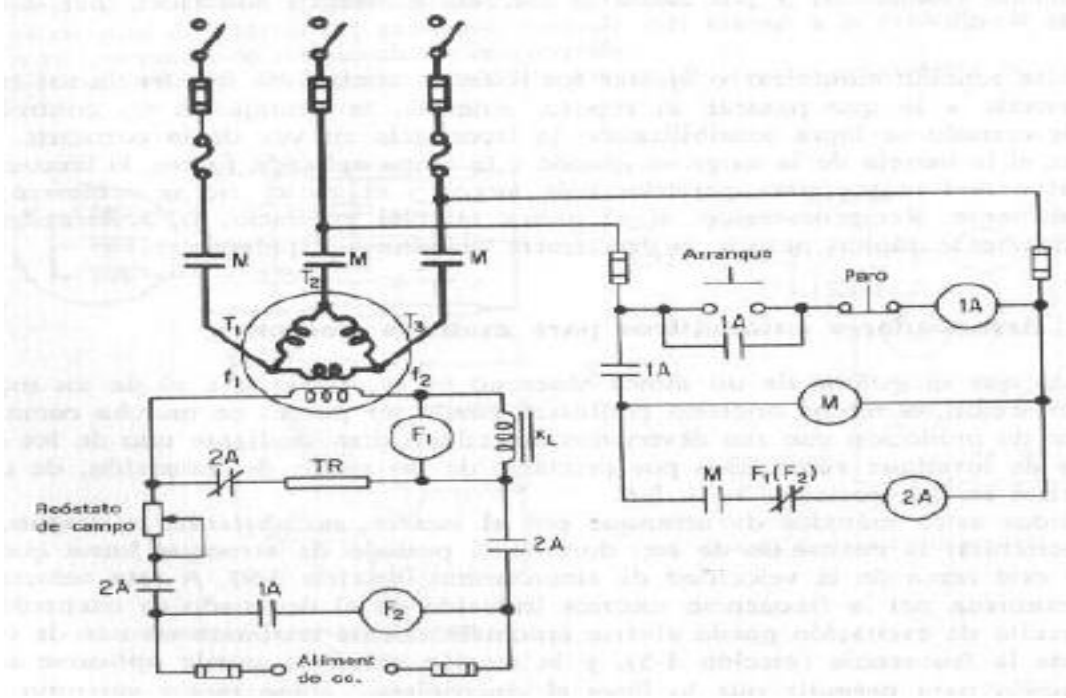


Fig. 4.30 Arrancador de un motor síncrono empleando relés de frecuencia polarizados.



CAPÍTULO 5 SELECCIÓN DE ELEMENTOS PARA ARRANQUE DE MOTORES ELÉCTRICOS Y COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ARRANQUE.

5.1.1 Comando y protección de motores eléctricos.

SALIDA A MOTOR (comando y protección de motores)

Los objetivos de una salida a motor son los siguientes:

- Comandar el motor (encendido y apagado del motor)
- Proteger a sus componentes contra los efectos de fallas de origen eléctrico
- Asegurar la seguridad del personal
- Maximizar la continuidad de servicio.

Para cumplir con los objetivos planteados, toda salida a motor debe cumplir con cuatro funciones básicas:

- Seccionamiento: separación del motor de la red de distribución eléctrica que lo alimenta.
- Conmutación o Comando: Establecimiento y corte de la corriente que tome la carga.
- Protección contra cortocircuitos: protección del motor contra los daños causados por altas corrientes.
- Protección contra sobrecargas: protección del motor contra los efectos de las corrientes de sobrecarga.

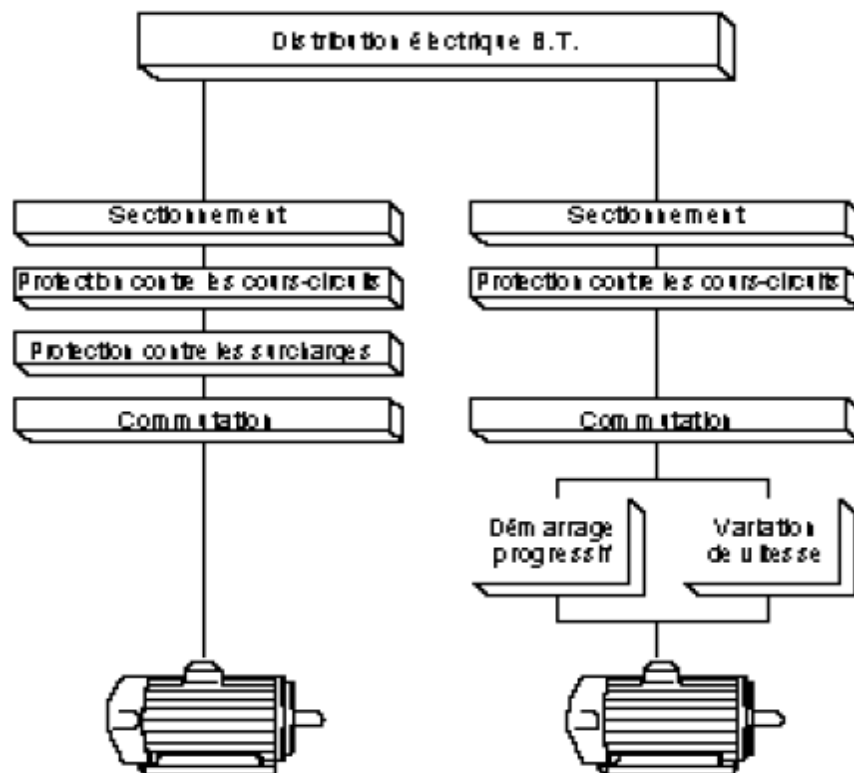


Fig.5.1 Los componentes que pueden integrar una salida a motor son:

- Contactores



- Relés térmicos
- Guardamotores magnéticos
- Fusibles
- Guardamotores magnetotérmicos
- Seccionadores
- Seccionadores portafusibles c/fusibles.

Contadores:

El contactor cumple con la función de comando o conmutación. Un contactor es un dispositivo mecánico de conexión controlado por un electroimán con una operación tipo on/off. Cuando la bobina del electroimán se encuentra energizada, el contactor se cierra y completa el circuito entre la fuente y la carga a través de sus contactos de potencia. Dependiendo de la tecnología del contactor, la parte móvil del electroimán que maneja los contactos móviles puede funcionar por rotación sobre un eje, por desplazamiento paralelo con relación a una parte fija o por una combinación de ambos.

Cuando la bobina es desenergizada, el contactor abre debido a la acción de un resorte de presión o de la fuerza de la gravedad de los propios contactos según el tipo constructivo de contactor.

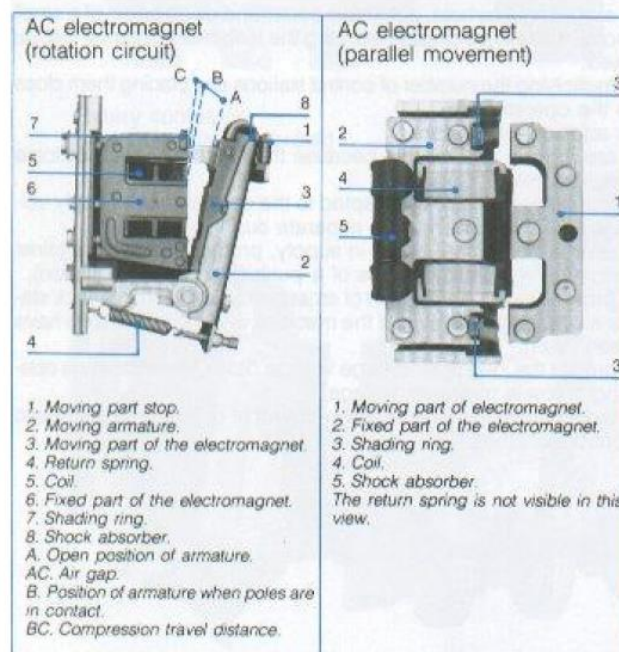


Fig. 5.2 Partes internas de un contactor.

Ventajas que ofrecen los contactores:

- Posibilidad de abrir o cerrar grandes corrientes a través de un dispositivo de baja corriente (bobina del contactor)
- Elevado número de maniobras
- Adecuados para servicio intermitente y continuo



- Posibilidad de implementación de comandos remotos y/o automáticos
- Son resistentes y confiables puesto que no contienen elementos internos delicados

Especificaciones técnicas características de un contactor:

- Categoría de utilización: La categoría de utilización define las condiciones de establecimiento y corte de la corriente dependiendo de la corriente nominal I_e y la tensión nominal U_e .

La categoría de utilización depende de la naturaleza de la carga a alimentar (motor a jaula de ardilla, motor rotor bobinado, resistencias, etc.) y de las condiciones en las que el establecimiento o el corte de la corriente se dan (motor en funcionamiento normal, corte durante el arranque, motor con rotor bloqueado, etc.).

La norma IEC 947 los clasifica en:

AC1: corresponde a todo tipo de cargas AC con $\cos\phi \geq 0.95$

AC2: corresponde a la operación de motores de rotor bobinado. Al cierre el contactor cierra sobre una corriente de arranque que es del orden de 2.5 veces la corriente nominal del motor. El contactor abre la corriente de arranque a un voltaje que no excede el voltaje de alimentación. Se encuentran en esta categoría algunos equipos para puentes grúa y máquinas de gran potencia con tiempos de arranque prolongados.

AC3: corresponde a la operación de motores de jaula de ardilla con apertura del contactor en funcionamiento normal del motor. El contactor cierra sobre una corriente que puede ser del orden de 5 a 7 veces la corriente nominal del motor y abre la corriente nominal del mismo con un voltaje entre bornes que será aproximadamente 20% del voltaje de la fuente de alimentación. La apertura en este caso no es severa.

AC4: corresponde a la operación de motores de jaula de ardilla con apertura del contactor sobre la corriente de arranque del motor. El contactor cierra sobre una corriente que puede ser del orden de 5 a 7 veces la corriente nominal del motor y abre la misma corriente con un voltaje entre bornes que será mayor cuanto menor sea la velocidad del motor, pudiendo llegar a ser de la misma magnitud que el voltaje de la fuente de alimentación.

Se encuentran en esta categoría algunos equipos de izaje de pequeñas potencias.

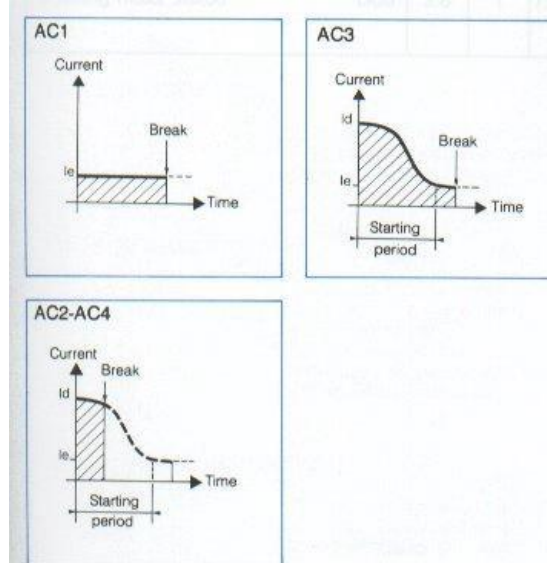


Fig. 5.3 Característica de los contactores clase AC1, AC2 y AC3.

DC1: Cualquier carga en DC que tenga una constante de tiempo $L/R \leq ms$

DC2, DC3, DC4 y DC5: corresponde a la operación de motores de corriente continua, con distintas constantes de tiempo y distintos regímenes de cierre y apertura del contactor.

- Corriente nominal I_e : Se define en función del voltaje nominal U_e , la categoría de utilización y la temperatura ambiente del contactor.
- Corriente nominal térmica convencional I_{th} : Es la corriente que puede conducir un contactor cerrado por un período superior a 8 horas sin que el aumento de temperatura producida por la misma supere los límites establecidos en la norma.
- Corriente de corta duración permitida: Es la corriente que puede conducir un contactor cerrado durante un período de tiempo corto luego de un período sin carga sin que se produzca un sobrecalentamiento peligroso.
- Voltaje nominal U_e : Es el voltaje que, junto con la corriente nominal I_e , determina el uso del contactor. Los ensayos establecidos en la norma así como la categoría de utilización asociada a un contactor están basados en este valor de tensión. En circuitos trifásicos se expresa como el valor compuesto de la tensión.
- Voltaje nominal de control U_c : es el voltaje nominal del circuito de control del contactor y en él se basan las características de operación.
- Voltaje nominal de aislación U_i : Este es el valor de voltaje utilizado para definir las características de aislación del contactor y es el utilizado en los ensayos dieléctricos para determinar caminos de fugas y distancias eléctricas.
- Voltaje nominal de impulso U_{imp} : El valor pico de una onda de tensión de impulso que el contactor puede soportar sin dañarse.
- Potencia nominal: Potencia nominal del mayor motor estándar que puede ser comandado por el contactor a la tensión nominal U_e .



- Poder de corte: Máximo valor de corriente que el contactor puede abrir bajo condiciones de apertura establecidas en la norma. No debe someterse al contactor a requerimientos de aperturas de corrientes mayores a su poder de corte.
- Poder de establecimiento: Máximo valor de corriente que el contactor puede establecer bajo condiciones de establecimiento fijadas en la norma.
- Factor de carga (m): relación entre el tiempo en que fluye la corriente (t) y la duración total del ciclo de carga (T)

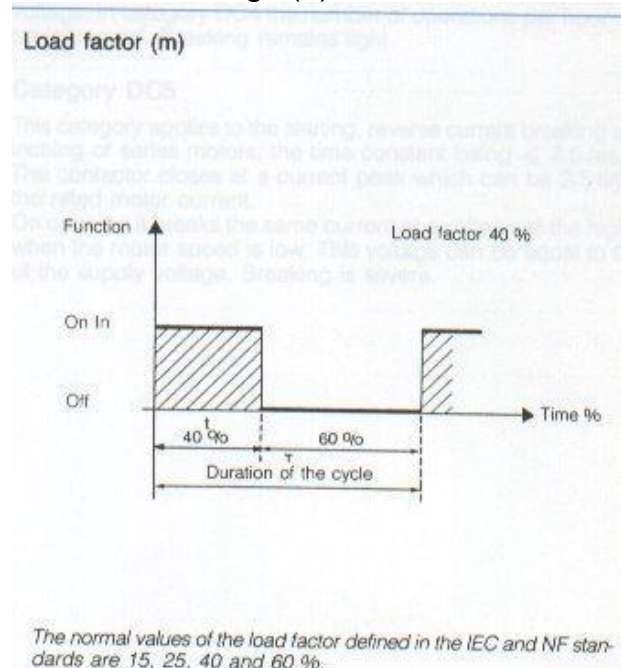


Fig.5.4 Los valores normales del factor de carga definidas en la norma IEC.

- Impedancia de polo: es la suma de la impedancia de todos los componentes del circuito entre el terminal de entrada y el terminal de salida del contactor. Se expresa como $R+jX$ y está dada a una frecuencia nominal de 50Hz. Se da un valor promedio por polo a I_e .
- Endurancia eléctrica: Es la cantidad promedio de ciclos de carga que los contactos principales del contactor pueden realizar sin mantenimiento. La endurancia eléctrica depende de la categoría de utilización, la corriente nominal I_e y el voltaje nominal U_e .
- endurancia mecánica: Es la cantidad promedio de ciclos de operación en vacío (es decir, sin corriente pasando por el contactor) que los contactos principales del contactor pueden realizar sin falla mecánica.

Como se puede observar, al ser el régimen AC1 menos estricto que el régimen AC3, el mismo contactor tiene un valor de corriente nominal I_e mayor para AC1 que para AC3.

La norma que especifica las características técnicas de los contactores es la norma IEC947-4-1 - "Contactores y Guardamotores – Contactores y Guardamotores electromecánicos".



A continuación se resumen las categorías de empleo:

- AC-1 Cargas no inductivas o ligeramente inductivas, factor de potencia > 0,95.
- AC-2 Motores de anillos rozantes: arranque y parada de motor a plena carga.
- AC-3 Motores de jaula de ardilla: arranque y parada de motor a plena carga.
- AC-4 Motores de jaula de ardilla: arranque, inversión de giro y arranques a impulsos.

Relés térmicos:

Estos relés cumplen con la función de protección térmica del motor contra sobrecargas y van asociados a un contactor que es el que realiza la apertura del circuito de potencia.

Puesto que protegen solamente contra sobrecargas, los relés térmicos deben complementarse con una protección contra cortocircuitos.

El relé de imagen térmica simula, a través de la utilización de un bimetálico, el calentamiento y enfriamiento del motor protegido en base a sus constantes de tiempo, vigilando las temperaturas alcanzadas en comparación con la máxima admisible como función de la duración de la sobrecarga. La temperatura es obtenida de forma indirecta, a través de la medición de la corriente.

A continuación se muestra un dibujo que ilustra el principio de funcionamiento del relé térmico:

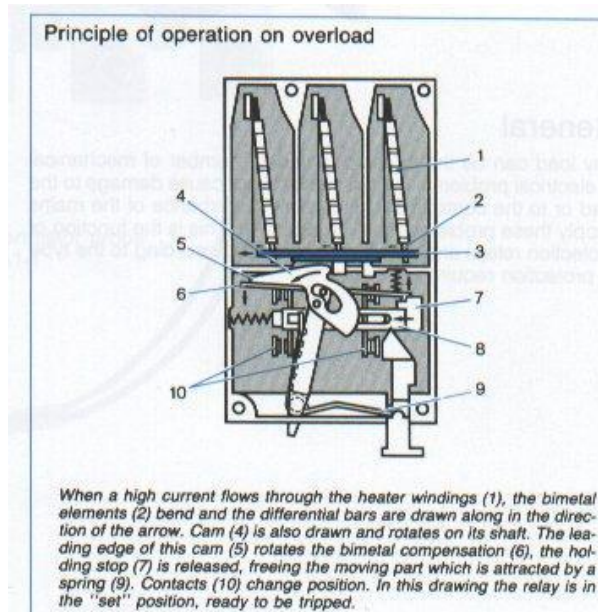


Fig.5.5 Principio de operación de un relé térmico en caso de sobrecarga.

Suponiendo que el proceso térmico que tiene lugar en un motor de inducción sometido a un régimen de sobrecarga es un proceso adiabático, es decir que todo el calor desarrollado contribuye a la elevación de temperatura de los arrollamientos, se llega a que el tiempo de sobrecarga admisible t_a del motor está dado por:



$$t_a = \tau_m \frac{A - I_{cp}^2}{I^2 - I_{cp}^2}$$

Siendo τ_m la constante de tiempo térmica de la máquina, I la corriente de sobrecarga en pu, I_{cp} la intensidad de precarga en pu y A un coeficiente mayor que 1, usualmente 1.3.

A continuación se muestra una expresión gráfica de la ecuación anteriormente expresada:

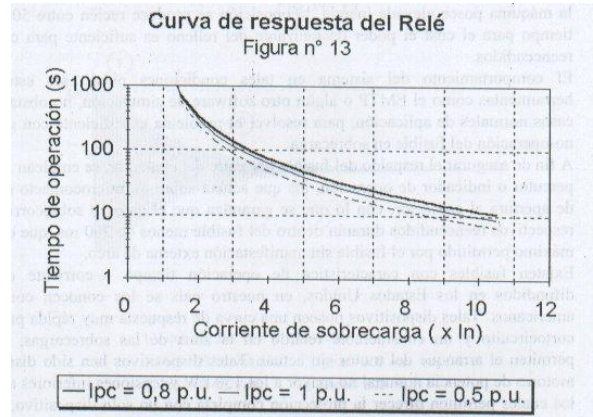


Fig.5.6 curva de respuesta del relé.

Se observa entonces que el tiempo de sobrecarga admisible está relacionado con la condición de precarga del motor, por lo que el relé térmico deberá ser sensible al estado de precarga. Es por esto que la mayoría de los relés térmicos dan sus curvas para distintos estados de precarga. La temperatura ambiente es un parámetro muy importante y variaciones de la misma pueden influir en el comportamiento del relé. Es por este motivo que la mayoría de los relés térmicos actuales están compensados, utilizando un elemento bimetálico de compensación independiente del elemento principal y sometido únicamente a la temperatura ambiente el cual balancea el comportamiento del bimetálico principal. Con esta compensación, se garantiza el comportamiento uniforme del relé para un rango de temperatura de -40°C a $+60^{\circ}\text{C}$ aproximadamente.

Adicionalmente, los relés térmicos pueden ser térmico-diferenciales, agregando a la protección contra sobrecargas la protección contra desbalance de corrientes. Los relés térmicos deben proteger el motor pero deben a su vez soportar la corriente de arranque durante el tiempo de arranque sin disparar. La norma que especifica este tipo de relés es la IEC 947-4 y establece distintas clases de relés, especificando tiempos de no apertura y de apertura para cada una de ellas como sigue:

Clase	Tiempos de intervención			
	No disparo		Disparo	
	1.05 lr	1.20 lr	1.5 lr	7.2 lr
10 A	>2 hs.	<2 hs.	<2 min.	2 a 10 seg.
10	>2 hs.	<2 hs.	<4 min.	4 a 10 seg.
20	>2 hs.	<2 hs.	<8 min.	6 a 20 seg.
30	>2 hs.	<2 hs.	<12 min.	9 a 30 seg.

Tabla 27 tiempos de intervención de los relés.



La selección de la clase del relé térmico a utilizar para la protección de un motor deberá tener en cuenta la clase de aislación del motor así como su régimen de funcionamiento: ciclo de operación, arranque, parada, etc. Los rangos de corrientes nominales de los relés térmicos van desde 0.10A a 200A aproximadamente. A continuación se muestran curvas de disparo para los relés clase 10A y 20.

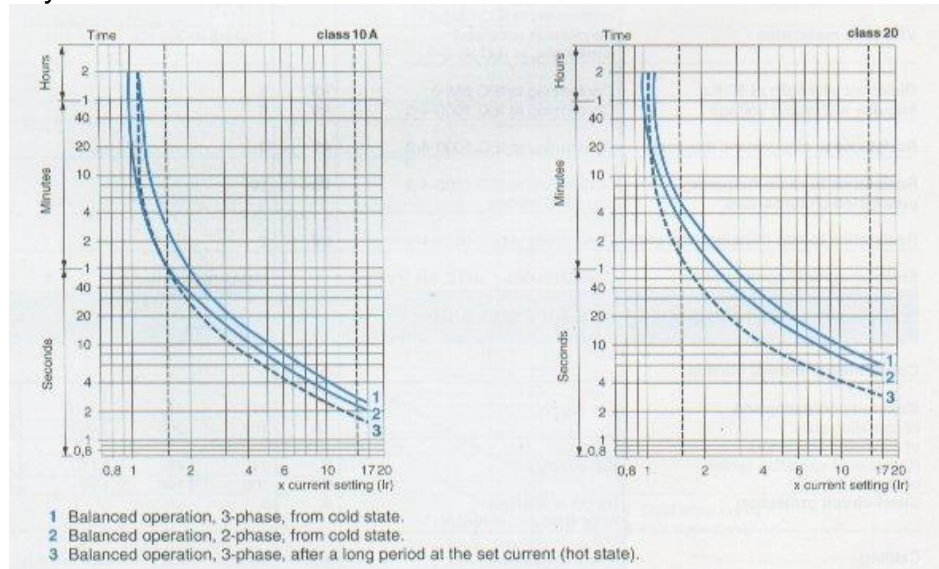


Fig. 5.7 Curvas de disparo para los relés clase 10A y 20.

Guardamotores magnéticos.

Son dispositivos de protección contra cortocircuito, de corte tripolar. Los guardamotores magnéticos cumplen la función de protección contra cortocircuitos, cumpliendo adicionalmente la función de seccionamiento.

Los requisitos para que cumplan con la función de protección contra cortocircuito son básicamente una pronta detección de la corriente de defecto y una rápida apertura de los contactos. Esto conduce a que los guardamotores magnéticos sean aparatos limitadores.

Siendo I_{nd} el umbral de no disparo e I_d el umbral de disparo. El umbral de disparo se ubica en promedio en los $13I_n$, dependiendo de los modelos.

El guardamotor magnético presenta un elevado poder de corte, siendo el rango del mismo desde 10kA hasta 100kA aproximadamente.

Usualmente, para completar la función de protección de una salida motor, el guardamotor magnético debe acompañarse de un contactor con relé térmico. A continuación, se muestra a modo de ejemplo la curva de disparo de un conjunto guardamotor magnético – relé térmico

La norma que especifica las características técnicas de los guardamotores es la norma IEC947-4-1 - “Contactores y Guardamotores – Contactores y Guardamotores electromecánicos”.

Fusibles.

El fusible, utilizado como elemento componente de una salida a motor, solo debe actuar frente a cortocircuitos. Es decir, las sobrecargas no deben producir la



operación del fusible, por lo cual debe emplearse el fusible de respaldo, llamado para baja tensión tipo aM.

La curva característica del fusible aM lo hace insensible a las sobrecargas, siendo diseñado el elemento fusible de este tipo de fusibles más resistente a la fatiga mecánica debida a los esfuerzos de contracción y dilatación térmica causadas por las sobrecorrientes de los sucesivos arranques.

Se muestra a continuación una figura donde se comparan las curvas de los fusibles tipo aM y gL (uso general).

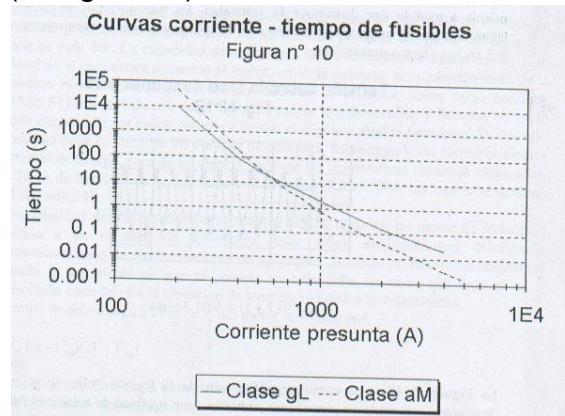


Fig. 5.8 Característica corriente-tiempo de fusibles.

Guardamotores magnetotérmicos

Son dispositivos que agrupan en un mismo aparato las funciones de protección contra cortocircuitos y contra sobrecargas.

5.2.1 Otros dispositivos de protección.

Los dispositivos estudiados hasta ahora calculan la temperatura en forma indirecta, a través de mediciones de corriente.

Para aquellos motores que por ser críticos para el proceso del que forman parte se entiende que deben ser protegidos de forma aún más eficiente, la protección contra sobrecargas se realiza mediante dispositivos térmicos o sensores de temperatura, termistores (resistencias variables con la temperatura), colocados dentro del bobinado del motor, procurando censar la temperatura del punto más caliente. Las sondas empleadas son del tipo de coeficiente de temperatura positivo (PTC), empleándose también en ciertos casos sondas de coeficientes negativos (NTC).

Igualmente, para estos motores puede emplearse adicionalmente, relés diferenciales, relés de desbalance de fases, relés de subtensiones, etc.

Cuando para arrancar el motor o cuando debido a que la aplicación requiere control de velocidad del motor se utiliza un arrancador suave o un variador de velocidad, dichos equipamientos ya traen usualmente integrada la protección contra sobrecarga del motor, por lo que, de utilizarse los mismos, puede seleccionarse una salida motor que obvie la función protección contra sobrecargas.

A continuación se presenta la tabla número 28 con los distintos dispositivos de protección y comando y las funciones que cumplen los mismos:



	Seccionamiento	Comando	Protección contra corto circuitos	Protección contra sobre cargas
Contactador		Si		Si
Rele térmico				
Guarda motor magnetico	Si		Si	
Seleccionador porta fusibles (c/fusibles)	Si		Si	
Guarda motor magneto termico	Si		Si	Si

Tabla 28 distintos dispositivos de protección y comando y las funciones que cumplen los mismos.

Luego de definidas las 4 funciones principales que debe cumplir toda salida a motor y de estudiados los distintos aparatos que se utilizan para cumplir con las mismas se llega a que existen distintas opciones para una salida a motor:

1º) Salida a 3 aparatos: CONTACTOR + RELE TERMICO + GUARDAMOTOR MAGNETICO o CONTACTOR + RELE TERMICO + SECCIONADOR PORTA FUSIBLE

2º) Salida a 2 aparatos: CONTACTOR + GUARDAMOTOR MAGNETOTERMICO multifunción que cumple con todas las funciones requeridas.

5.2.2 Coordinación de las protecciones de una salida a motor.

La norma IEC 947-4-1 establece los requisitos a cumplir por la combinación de elementos que constituyen una salida a motor y especifica 3 tipos de coordinación: Coordinación tipo 1(IEC 947-4-1): Este tipo de coordinación permite, ante una falta, daño a todos o a algún elemento componente del arranque motor, pero el citado deterioro debe ser contenido dentro del gabinete. No deben existir riesgos ni para la instalación ni para el personal involucrado. Para continuar con el servicio se requerirá la reparación o el reemplazo de partes componentes.

Coordinación tipo 2 (IEC 947-4-1) : Los únicos daños permitidos ante una falta para este tipo de coordinación son la soldadura leve de los contactos, sin riesgo para el personal e instalación, debiendo poder continuar con el servicio sin necesidad de ningún recambio o reparación.

Coordinación tipo 3 o total (IEC 947-6-2) en la cual no se permite daño alguno a ningún componente del arranque motor, impidiendo incluso la soldadura de los contactos del contactor o arrancador. El estudio de la coordinación entre los distintos dispositivos se efectúa en forma gráfica. Para poder realizar el mismo se deben tener los siguientes datos:

- Curva corriente – tiempo del relé térmico
- Curva corriente – tiempo del fusible de respaldo o guardamotor magnético
- Curva de corriente de arranque del motor
- Capacidad de ruptura del contactor
- Capacidad de sobrecarga y resistencia al cortocircuito del cable de

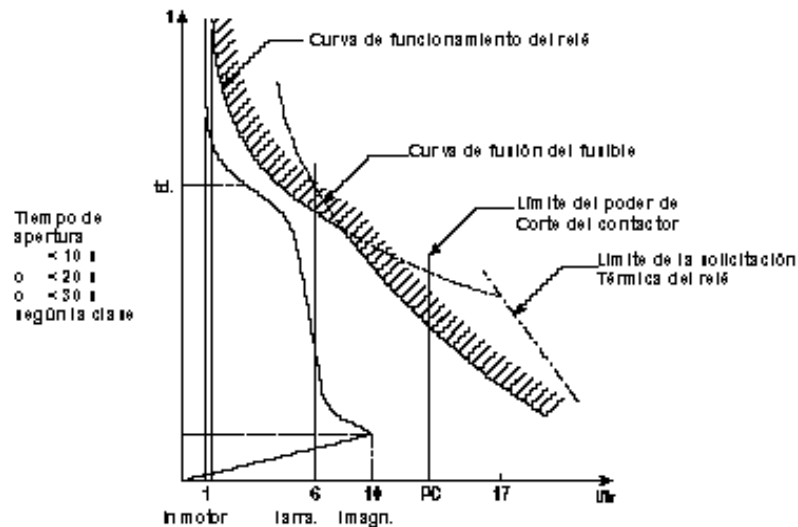


alimentación

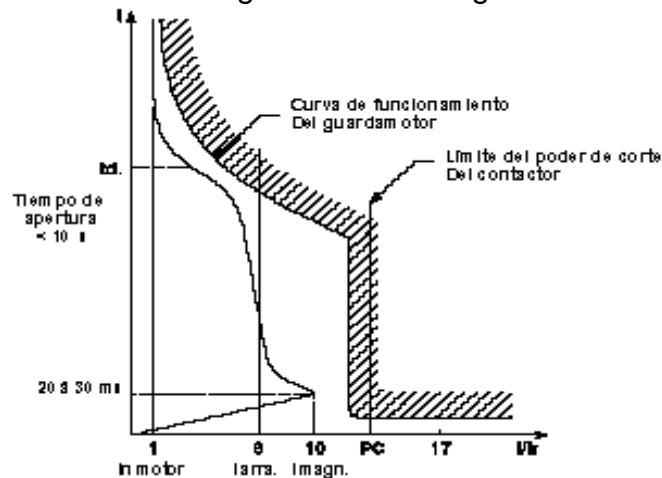
Las condiciones que se deben cumplir con la coordinación son las siguientes:

- Se debe permitir el arranque del motor, pero si el arranque se demora o el motor queda calado debe operar el relé térmico.
- Para corrientes de falla, mayores que la capacidad de ruptura del contactor, debe actuar primero la protección magnética (fusible o guardamotor magnético) que el relé térmico, puesto que de lo contrario, el contactor no estaría en condiciones de abrir la corriente indicada por el relé térmico.
- Para corrientes superiores a $25I_n$, la recta de I^2t del relé térmico debe estar siempre por encima de la correspondiente del dispositivo que lo protege contra cortocircuitos (fusible o guardamotor magnético)
- La corriente de arranque con un factor de seguridad 2 en tiempo, durante el tiempo de arranque, no debe alcanzar la curva característica de la protección contra cortocircuito, para así tener en cuenta el estado de precarga y los arranques sucesivos. A continuación, veremos gráficamente, la coordinación para distinto tipo de salidas:

Solución 1 productos: contactor + relé térmico + seccionador portafusibles



Solución 2 productos: contactor + guardamotor magnetotérmico





Solución 3 productos: contactor + relé térmico + guardamotor magnético

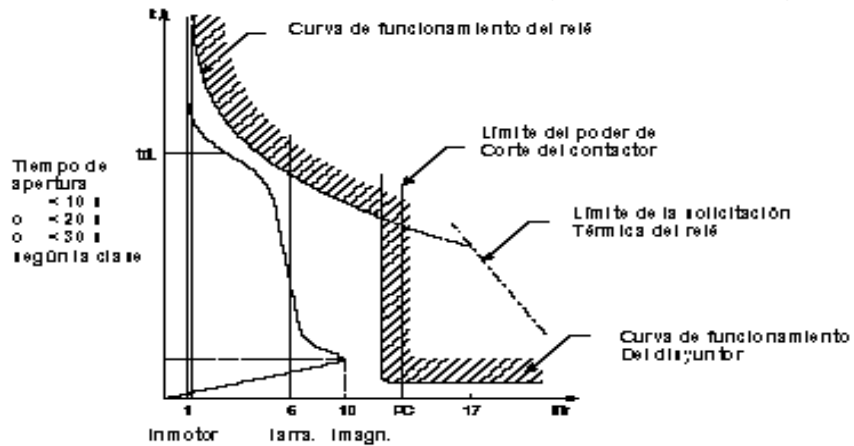


Fig.5.9 Ejemplos de salidas.

5.3.1 Conexión de los distintos elementos de una salida a motor (diagramas de comando).

Existen muchas formas de comandar uno o varios motores, dependiendo de los elementos que se utilicen para su arranque y protección así como del funcionamiento previsto del motor (un sentido de marcha, dos sentidos de marcha, comando por botoneras, comando remoto, etc.)

A continuación se presenta un esquema de comando estándar para arranque directo y otro para arranque estrella – triángulo.

Arranque directo

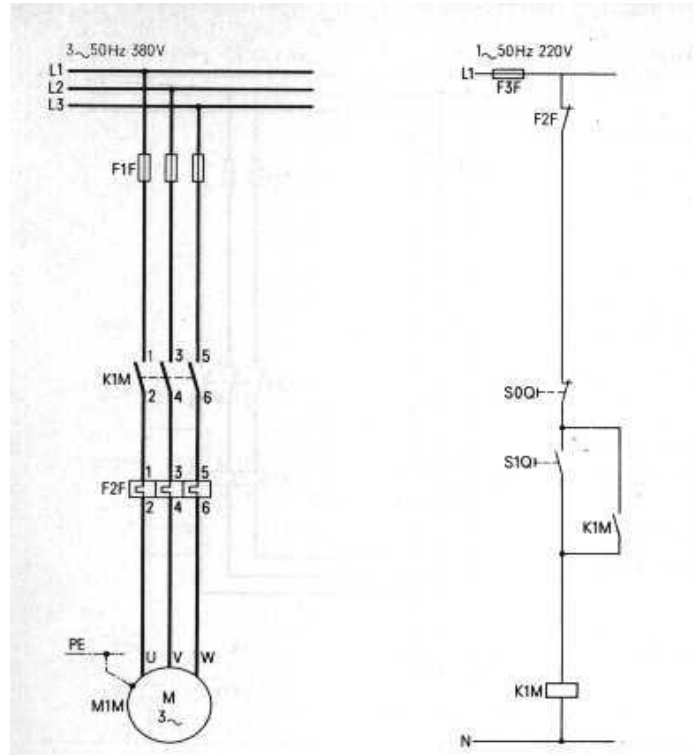


Fig. 5.10 diagrama de fuerza y de control de un arranque directo.



Siendo:

F1F y F3F: Fusibles de protección contra cortocircuito del circuito de potencia y del circuito de comando respectivamente

K1M: contactor de comando

F2F: relé térmico, c / un contacto NC

S1Q: Pulsador NA de arranque

S0Q: Pulsador NC de parada

Explicación del funcionamiento del diagrama de comando:

Inicialmente, el contactor K1M se encuentra abierto.

Marcha: Al presionar el pulsador S1 y no haber falla térmica en el motor, el contacto F2F del relé térmico está cerrado; como el pulsador S0Q es NC y no está presionado el contacto S0Q está cerrado y al cerrarse el contacto S1Q se energiza la bobina del contactor K1M cerrándose entonces sus contactos principales.

Al cerrarse el contactor K1M, se cierran sus contactos auxiliares, entonces, independientemente que se deje de presionar S1Q, la bobina se mantiene alimentada a través del contacto auxiliar de K1M en paralelo con S1Q y el contactor permanece cerrado. A este contacto de K1M en paralelo con el pulsador de marcha se le denomina usualmente contacto de autoretención.

Parada: Al presionar el pulsador S0Q, como es un contacto NC, el contacto S0Q que aparece en el diagrama de comando se abre, dejando sin alimentación a la bobina del contactor K1M. K1M, con su bobina desenergizada, se abre.

Parada por disparo del relé térmico: En caso de detectarse una sobrecarga, el contacto NC de F2F que figura en el diagrama de comando se abre, dejando sin alimentación a la bobina del contactor K1M. K1M, con su bobina desenergizada, se abre. Observar que en caso de desear comandar el contactor desde más de un punto, alcanzará con poner contactos NA de los comandos de apertura adicionales que se desee en paralelo con el contacto de S1Q y contactos NC de los comandos de cierre adicionales que se desee en serie con el contacto de S0Q.

Arranque estrella - triángulo:

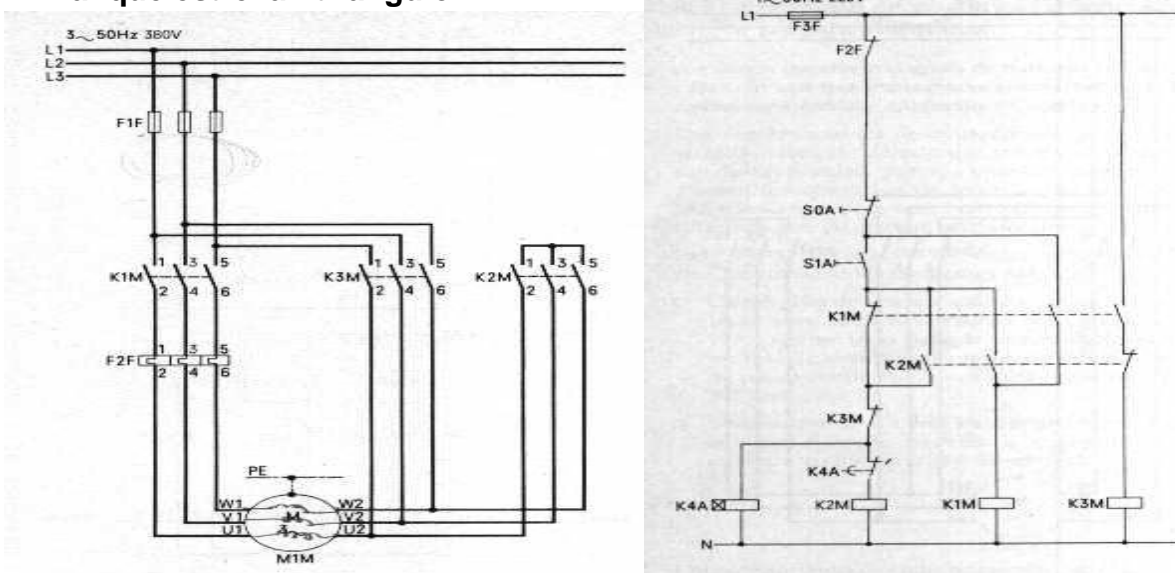


Fig.5.11 Diagrama de fuerza y de control de un arranque estrella triángulo.



Siendo:

F1F y F3F: Fusibles de protección contra cortocircuito del circuito de potencia y del circuito de comando respectivamente

K1M, K2M: contactores de comando c/ 2NA+1NC c/no

K3M: contactor de comando c/ 1NC

F2F: relé térmico, c / un contacto NC

S1A: Pulsador NA de arranque, 1NA

S0A: Pulsador NC de parada, 1NC

K4A: temporizador c/retardo a la conexión, 1NC

Explicación del funcionamiento del diagrama de comando:

La conexión en estrella de los bobinados del motor se logra cerrando el contactor K2M y la conexión en triángulo cerrando el contactor K3M.

Inicialmente, los tres contactores están abiertos.

Marcha: Al pulsar S1A, como el NC del relé térmico F2F está cerrado puesto que no hay falla por sobrecarga, el NC de S0A está cerrado puesto que no está presionado el pulsador de parada, los contactos NC de K1M y K3M están cerrados puesto que ambos contactores están abiertos y el contacto NC del temporizador K4A está cerrado puesto que el temporizador no está funcionando, se energiza la bobina del contactor K2M, cerrándose el contactor K2M y se activa el temporizador. En este momento se ha conectado los bobinados del motor en estrella.

Al energizarse K2M, se cierran sus contactos auxiliares NA y se energiza entonces la bobina de K1M, cerrándose el contactor K1M y entregando tensión al motor.

Tanto K1M como K2M permanecen cerrados, aún luego de mantener S1A pulsado, a través de los contactos de autoretenición de K2M. Al estar K2M cerrado, su contacto NC está abierto y la bobina de K3M no está alimentada, por lo que K3M está abierto.

Cuando el temporizador llegó a su valor de seteo el contacto NC de K4A se abre, desenergizando la bobina de K2M, lo que provoca la apertura de K2M.

K1M permanece cerrado, entonces su contacto NA está cerrado y como K2M abrió, su contacto NC se cerró, por lo que se energiza la bobina de K3M, provocando el cierre de K3M y la conexión de los bobinados del motor en triángulo, lo que implica el fin del arranque.

Parada: Al presionar el pulsador S0A, como es un contacto NC, el contacto S0A que aparece en el diagrama de comando se abre, dejando sin alimentación a las bobinas que estuvieran activadas (sean K1M, K2M y K4A o solamente K1M). K1M y K2M, con su bobina desenergizada, se abren. Al abrir K1M, su contacto NA se abre por lo que se desenergiza la bobina de K3M. Parada por disparo del relé térmico: En caso de detectarse una sobrecarga, el contacto NC de F2F que figura en el diagrama de comando se abre, dejando sin alimentación a las bobinas que estuvieran activadas (sean K1M, K2M y K4A o solamente K1M). K1M y K2M, con su bobina desenergizada, se abren. Al abrir K1M, su contacto NA se abre por lo que se desenergiza la bobina de K3M.

5.4.1 conexión de un motor trifásico.

Cuando se alimenta un motor trifásico, los datos de la placa del motor deben corresponderse con la tensión y la frecuencia de alimentación. La conexión está



implementada a través de los tornillos (versión estándar) en el cajetín de conexiones del motor y debemos hacer una distinción entre dos tipos de conexión, la conexión en estrella y la conexión en triángulo. Ejemplo con una alimentación de 3 AC 400 V, 50 Hz .

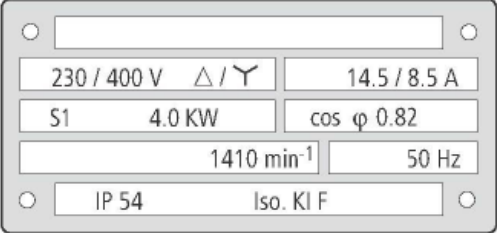
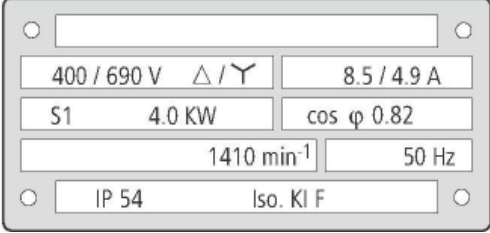
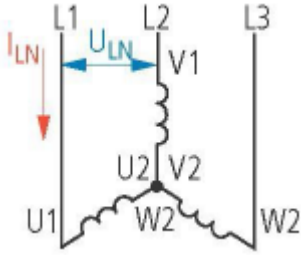
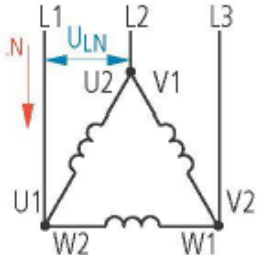
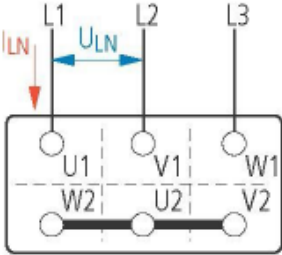
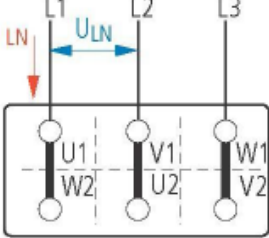
Conexión en estrella		Conexión en triángulo	
			
			
$U_{LN} = \sqrt{3} \cdot U_W$		$U_{LN} = U_W$	
$I_{LN} = I_W$		$I_{LN} = \sqrt{3} \cdot I_W$	
			
<ul style="list-style-type: none"> • Con una especificación de tensión de 230/400 V, este motor debe estar conectado a la red trifásica ($U_{LN} = 400$ V) con una configuración en estrella. • Cada devanado del motor está diseñado para soportar un máximo de 230V. • Los tres terminales (W2, V2, U2) se conectan entre sí (conexión estrella) para que la tensión entre los terminales de entrada (U1, V1, W1) y el punto intermedio (estrella) sea 230V. 		<ul style="list-style-type: none"> • Con una especificación de tensión de 400/690 V, este motor debe estar conectado a la red trifásica ($U_{LN} = 400$ V) con una configuración en triángulo. • Cada devanado del motor está diseñado para soportar un máximo de 400V y podemos conectarlos directamente. • Para un arranque directo, los terminales de los tres devanados deben estar conectados entre sí (conexión triángulo) para que la tensión entre los terminales de entrada (U1, V1, W1) sea 400V. 	

Tabla 29 ejemplo de una conexión en estrella y en triángulo de un motor trifásico.

En general, las propiedades de un motor trifásico se definen en las normas (DIN / VDE 0530, IEC / EN 60034). Sin embargo, el diseño constructivo es dominio de los fabricantes. Por ejemplo, en un mercado sensible a los precios, los motores de



pequeñas potencias (<4 kW) – que suelen usarse para bombas y ventiladores – frecuentemente los podemos encontrar sin cajetín de conexiones. Aquí los devanados están conectados internamente en configuración estrella, y sólo disponemos de tres cables para conectarlos a la tensión asignada.

Independientemente del diseño (con / sin cajetín de terminales), las conexiones del motor trifásico se denotan por su orden alfabético (por ejemplo, U1, V1, W1) se corresponde con la secuencia de tensión de red (L1, L2, L3) y hace que el motor gire en sentido horario. El sentido de giro se especifica mirando directamente al eje del motor. En motores con dos ejes, el extremo de accionamiento se denomina "D", y el extremo de no accionamiento "N" (D = drive, N = no drive). La rotación antihoraria del motor se consigue intercambiando dos fases de la tensión de entrada.

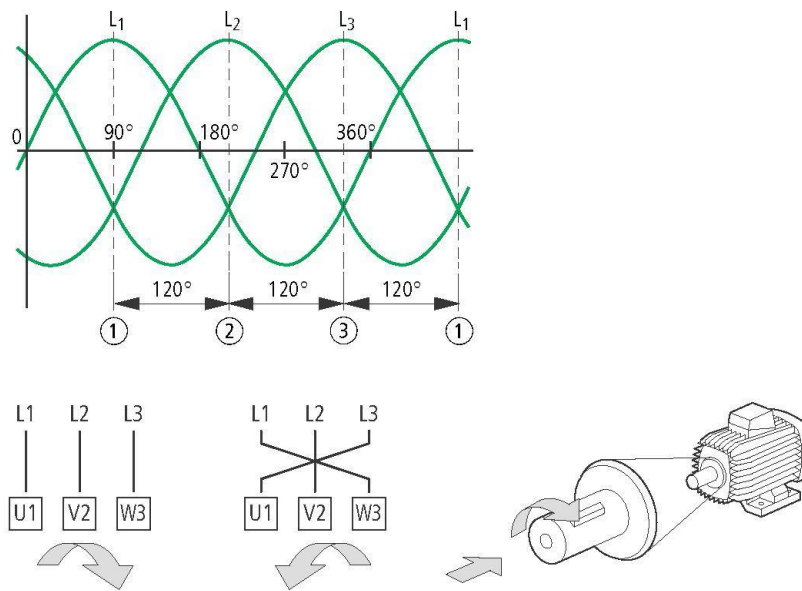


Fig.5.12 Rotación horaria: Secuencia de fases – Cajetín de terminales – Extremo de accionamiento.

El punto de operación (M_M) del motor trifásico asíncrono está descrito por el rango de tensión nominal y la frecuencia correspondiente (ej. 400 V / 50 Hz). La velocidad (de rotación) se determina por la frecuencia de la red eléctrica ($n \sim f$). Esto depende de la carga y sólo se mantiene siempre y cuando el par del motor (M_M) y par de carga (M_L) tengan la misma magnitud.

Los datos nominales de potencia eléctrica y mecánica del punto óptimo de trabajo deben estar especificados en la placa de características del motor.

Los datos de la operación son inestables durante el proceso de arranque (proceso de aceleración). La unidad solo será estable en el punto óptimo de trabajo (M_M).

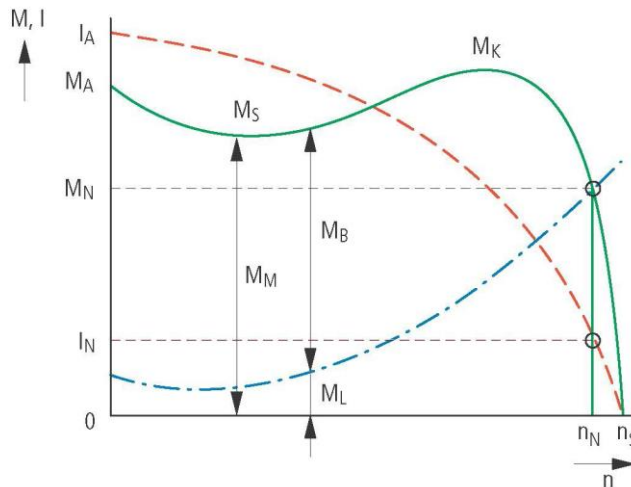


Fig. 5.13 Curva característica del arranque de un motor trifásico asíncrono. I_A = Intensidad de arranque.

I_N = Intensidad nominal en el punto de trabajo

M_A = Par de arranque

M_B = Par de aceleración ($M_M > M_L$)

M_K = Máximo valor del par

M_L = Par de la carga

M_M = Par del motor (punto de trabajo)

M_N = Par nominal de la carga

n = Velocidad (valor actual)

n_N = Velocidad nominal en el punto de trabajo

n_S = Velocidad de sincronización

$(n_S - n_N)$ = Velocidad de deslizamiento

$$P = \frac{M_N \cdot n}{9550}$$

P = [kW]

f = [Hz] = 1/sec

M_N = [Nm]

n = [min^{-1}]

1 min = 60 sec

$$n = \frac{f}{p} \cdot (1 - s)$$

$$s = \frac{n_S - n}{n_S} \cdot 100\%$$

5.5.1 Funcionamiento y selección para un 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.

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 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. El sinónimo de esto es el PKZM. En la alimentación del motor, este protege la conmutación (contactor DILM), 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. La combinación de arranque de motor (MSC) ofrece una solución ideal para el arranque directo del motor. El MSC en su diseño estándar consiste en un interruptor protector de motor PKZM0 y un contactor DIL enchufables. En la versión MSCDE, el interruptor protector de motor PKE para corrientes de motor de hasta 65 A, ofrece una alternativa innovadora a las soluciones bimetálicas (PKZM0). Con su alto nivel de flexibilidad y los mismos accesorios, el MSCDE cumple con todas las demandas del cliente.

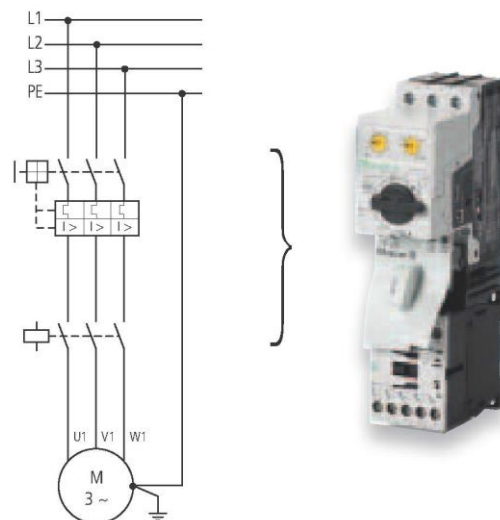


Fig.5.14 Diagrama de fuerza y representación Física de un arrancador directo.

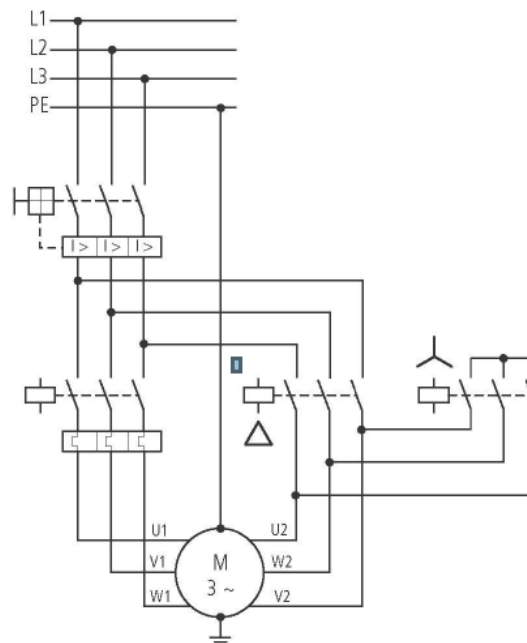


5.5.2 Funcionamiento y selección para un arranque estrella-triángulo.

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 el cajetín 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 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.

Fig. 5.15
Diagrama de
conexión de
una configuración
estrella-triángulo.
Con protección
bimetálica.
 $0.58 \times I_e$
 $t_a \leq 15 \text{ s}$



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 (M_L) 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 centrifugas.

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 figura 5.15) 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 ($>15s$) de hasta 60 segundos, el contactor de estrella debe seleccionarse de la misma magnitud que el contactor principal.

5.5.3 arrancadores suaves.

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 (M_L) y las características del par motor (M_M), 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.

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 fase de aceleración o durante la fase de desaceleración, pueden ser Bypassados a través de los contactos de Bypass 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 (tabla 30).



<ul style="list-style-type: none">• Dos fases controladas• Fácil manejo, con 3 valores de ajuste (t_{Start}, U_{Start}, t_{Stop})• Controlado por tiempo, rampa de tensión lineal• Generalmente con Bypass interno• Precio atractivo para alternativa al arranque estrella-triángulo.• Configuración solo en línea.• De motores pequeños a medianos (<250 kW)	<ul style="list-style-type: none">• Tres fases controladas• Para tareas exigentes• Aplicaciones preseleccionables• Programable• Circuitos de control y lazo cerrado.• Con limitación de corriente (I_{2t}) y funciones de protección de motor.• Comunicación (Interface de bus)• Configuración en línea e "indelta"• Para motores a partir de 7,5kW aprox.

Tabla 30 Características de arrancadores suaves

El tiempo de aceleración de una unidad con un arrancador suave es el resultado de la configuración de la tensión de arranque (U_{Start}) y el tiempo de rampa (t_{Start}) para el aumento lineal hasta la tensión de completa de red (U_{LN}). 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 par de arranque necesario (U_{Start}) y el tiempo de rampa (t_{Start}) se configuran de acuerdo a los requisitos del arranque.

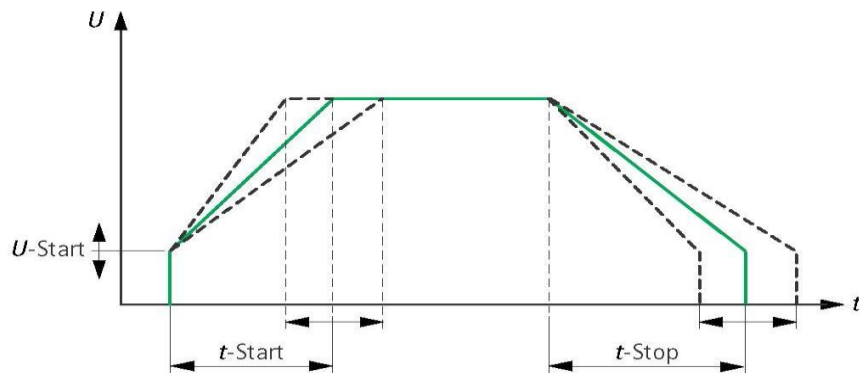


Fig.5.16 Curva de tensión en un arranque suave.



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.

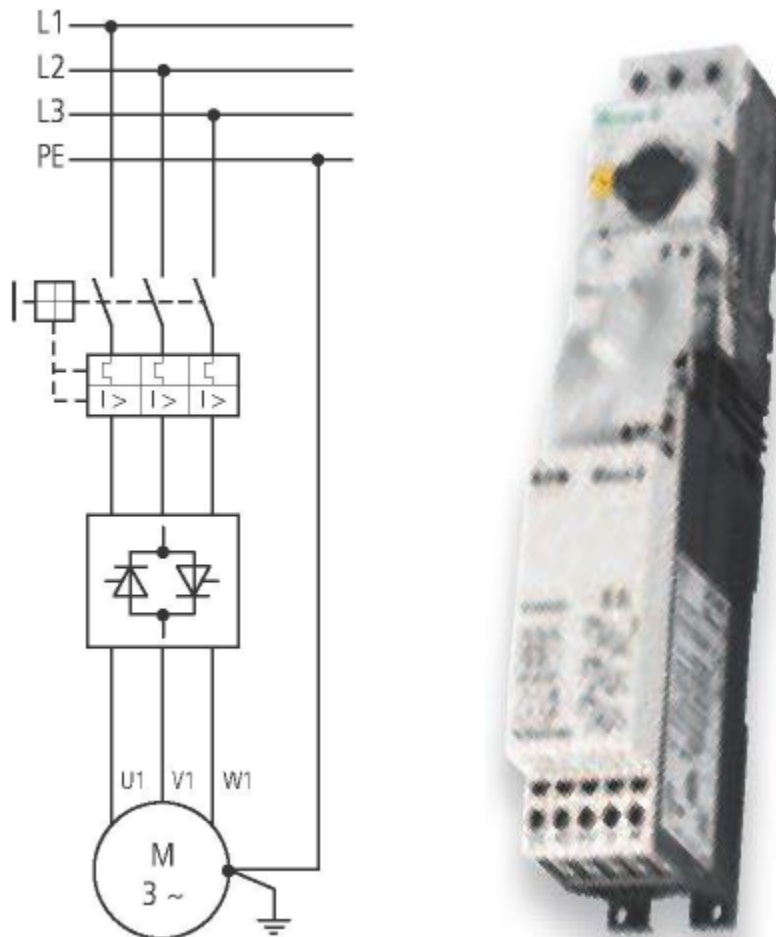


Fig.5.17 Alimentación del motor, Arrancador suave DS7, configuración "en línea" con PKZM0.



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).

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.

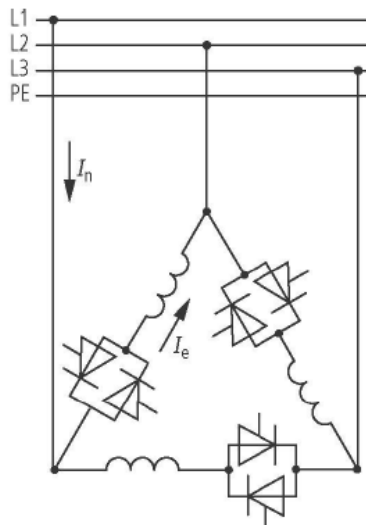


Fig.5.18 Configuración “In-delta”



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.

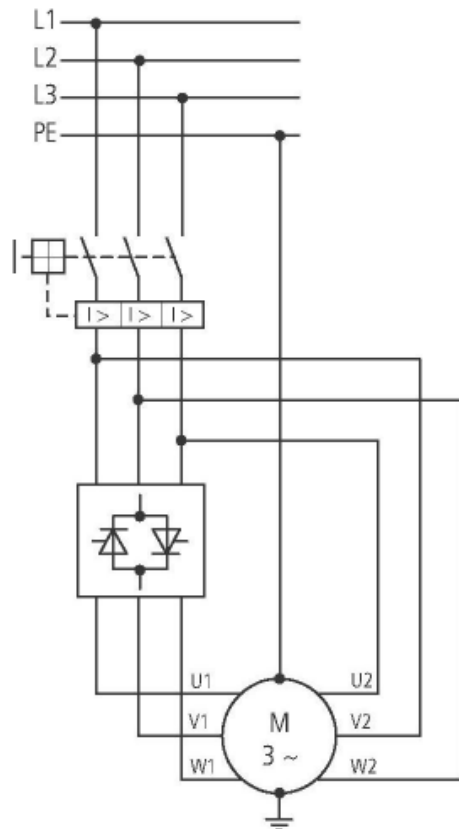


Fig.5.19 Alimentación del motor, arrancador suave DM4, configuración “in delta”

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 Convertidores de frecuencia

El convertidor de frecuencia es en última instancia, la mejor solución para un arranque continuo y sin escalones de motor asíncrono trifásico. La limitación de corriente ajustable evita los picos de corriente en el suministro de red eléctrica y repentinas cargas en las partes mecánicas de la máquina y en los sistemas.

Además del arranque suave, el convertidor de frecuencia también permite el control de la velocidad (frecuencia) del motor. Considerando que los motores estando conectados directamente a la red eléctrica sólo pueden lograr las condiciones ideales de funcionamiento en el punto de estado de funcionamiento constante (= indicación de la placa de características), pueden ser utilizados en todo el rango de velocidades con el control de frecuencia, por ejemplo, desde 4V a



0,5Hz a 400V 50Hz. La relación constante de voltaje / frecuencia (V/f) garantiza puntos independientes que operan con el par nominal de la carga (M_M).

En comparación con las soluciones anteriormente descritas, los convertidores de frecuencia parecen ser la solución más costosa a primera vista.

El mayor coste de adquisición y las medidas adicionales sobre la instalación (cables blindados y filtro RFI para la compatibilidad electromagnética, EMC) son las principales razones. Pero durante una operación a largo plazo, el arranque suave del motor, además de la eficiencia energética y la optimización de procesos, muestra beneficios económicos. Esto es especialmente cierto para bombas y ventiladores. Por la adecuación de la velocidad de rotación del proceso de producción y la compensación de interferencias externas, el convertidor de frecuencia garantiza una vida útil más larga y una mejor seguridad funcional.

Otras ventajas de los convertidores de frecuencia incluyen la estabilidad a altas velocidades con fluctuaciones en la carga (fluctuaciones por debajo de un 1%) y la opción de cambio en el sentido de giro. A medida que se genera el campo de rotación del convertidor de frecuencia, un simple comando de control es todo lo que se requiere para cambiar la secuencia de fases y la dirección de giro del motor. La protección electrónica del motor (control de I_{2t}) integrada en los convertidores de frecuencia también asegura un funcionamiento sin la necesidad de medidas adicionales de seguridad (relés de sobrecarga). Dependiendo del método de aplicación, parametrizar los rangos de temperatura en el convertidor de frecuencia proporcionan un mayor nivel de protección térmica del motor. La completa protección del motor también es posible en combinación con termistores. La detección de sobrecarga y subcarga también pueden mejorar la seguridad operacional de la unidad.

El convertidor de frecuencia funciona como un convertidor de energía de la alimentación de un motor. El convertidor obtiene la corriente activa desde la red eléctrica a través del rectificador y suministra al motor corriente activa y reactiva a través del inversor. La potencia reactiva necesaria para el funcionamiento del motor es proporcionada por los condensadores del circuito intermedio. En cuanto a la red eléctrica se refiere, el convertidor de frecuencia se comporta prácticamente como una carga resistiva ($\cos \varphi \sim 1$).

La conversión de energía y los tipos actuales asociados se deben considerar en el diseño de los dispositivos de conmutación y de protección de la derivación a motor. A tal efecto, los componentes electromecánicos (por ejemplo, fusibles, reactores de línea, contactores de red) aguas arriba del convertidor de frecuencia se dimensionan de acuerdo con la corriente de entrada (corriente activa corriente) y la categoría de empleo AC-1 (norma IEC60947-4-1). Los componentes de la salida del variador de frecuencia (por ejemplo, los reactores de motor, filtros de onda, los cables del motor) se dimensionan de acuerdo con la corriente de funcionamiento del motor conectado y la categoría de empleo AC-3.

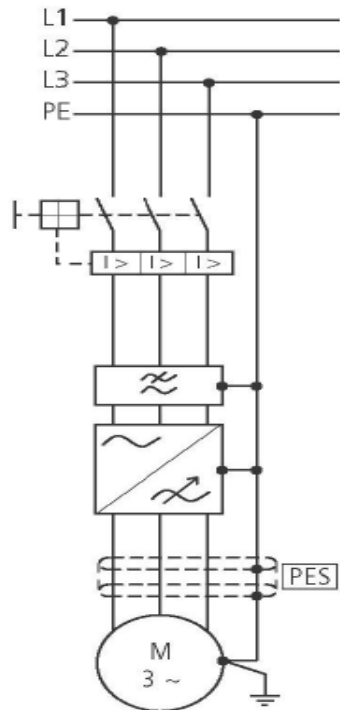


Fig.5.20 Alimentación del motor, Convertidor de frecuencia, con el M-Max como ejemplo.

Durante el funcionamiento del motor, los convertidores de frecuencia difieren completamente del método de operación del inversor que puede ajustarse por el usuario. Además del control estándar U/f con una curva característica lineal o cuadrática, el control de velocidad sensorless con compensación de deslizamiento y el control vectorial del par son métodos en uso conocidos hoy en día. Considerando que el control U/f permite el funcionamiento en paralelo de varios motores - incluso con diferentes rangos de la salida - en la salida del convertidor de frecuencia, el control de velocidad y vectorial se han diseñado exclusivamente para funcionar con motores individuales. Por la presente, el convertidor de frecuencia se ajustará automáticamente a las características del motor (individual) asíncrono trifásico a través del llamado "auto-tuning".

La descripción detallada de este procedimiento específico de operación con convertidores de frecuencia, sin embargo, excede de la visión simplificada de los métodos más conocidos para el arranque y el control de motores trifásicos asíncronos. Comparación de los diferentes tipos de arranque de motores trifásicos jaula de ardilla.




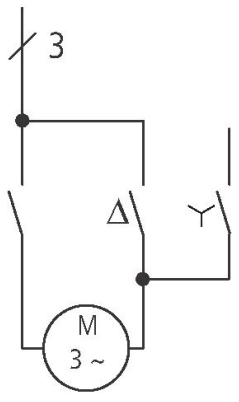

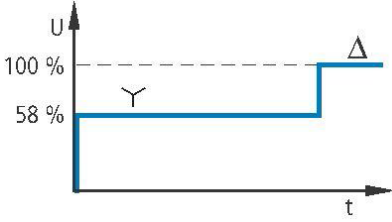
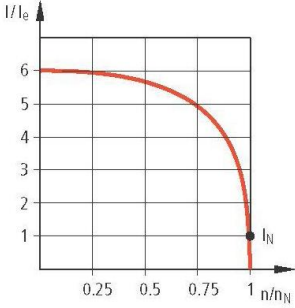
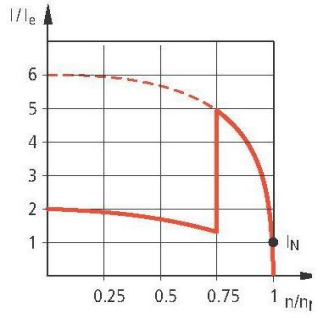
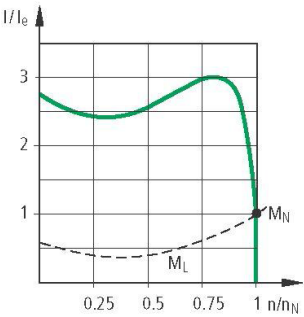
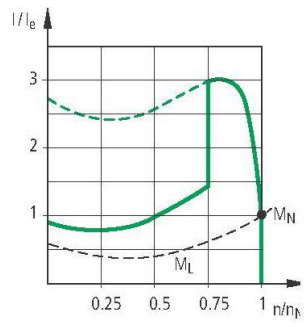
	Arranque directo	Estrella- triángulo
Diagrama		
Curva de tensión		
Carga en la red en el arranque	Alto	Medio
Curva de intensidad		
Intensidad relativa en el arranque	4...8x I_e (Dependiendo del motor)	1,3...3x I_e (~1/3 comparado con un arranque directo)
Curva de par		

Tabla 31 continuación



Par relativo en el arranque	1,5...3x M_N (dependiendo del motor)	0,5...1x M_N (~ 1/3 comparado con un arranque directo)
Características	- Alta aceleración con alto consumo en el arranque - Alta carga mecánica	- Arranque con reducción de par y corriente - Pico de par y corriente en el cambio
Áreas de aplicación	Unidades en suministros estables que permiten altas corrientes de arranque (pares)	Unidades que solo están sujetas a la carga después de la aceleración.

Tabla 31 Características entre los tipos de arranque para motor trifásico más usados. El uso y la aplicación determinan la selección del modo de arranque para un motor trifásico asíncrono.

	Arrancador suave	Convertidor de frecuencia
Diagrama		
Curva de tensión		
Carga en la red en el arranque	De bajo a medio	Bajo
Curva de intensidad		

Tabla 31 continuación



Intensidad relativa en el arranque	2...6x I_e (Reducido por el control de la tensión)	≤ 1 (...2x) I_e (ajustable)
Curva de par		
Par relativo en el arranque	0,1...1x M_N ($M \sim U^2$, El par es proporcional al cuadrado de la tensión)	$\sim 0,1...2x M_N$ ($M \sim U/f$, par ajustable)
Características	- Características de arranque ajustables - Posibilidad de rampa de parada	- Alto par a baja corriente - Características de arranque ajustables
Áreas de aplicación	Unidades que requieren una progresión suave del par o una reducción de corriente	Unidades que requieren un arranque controlado y un ajuste de velocidad sin escalones

Tabla 31 (continuación) Características entre los tipos de arranque para motor trifásico más usados.



5.6.1 Selección de elementos de control para arranque estrella –delta de motor de 10 hp 60hz.

Datos del motor:

4 polos.

$V = 440.$

$r/min = 1800.$

$f = 60HZ.$

$P = 10 HP.$

$\eta = 88.1 \%$

$Fp = 0.85$

Calculando potencia en KVA

$$S_n = \frac{P_n * 0.745}{\eta * \cos\phi}$$

$$S_n = \frac{10HP * 0.745}{0.88 * 0.85} = 9.95KVA$$

Calculando la $I_n.$

$$I_n = \frac{P_{(KVA)}}{\sqrt{3} * V_{(KV)}}$$

$$I_n = \frac{9.95 KVA}{\sqrt{3} * 0.44 KV}$$

$$I_n = 13.05 A.$$

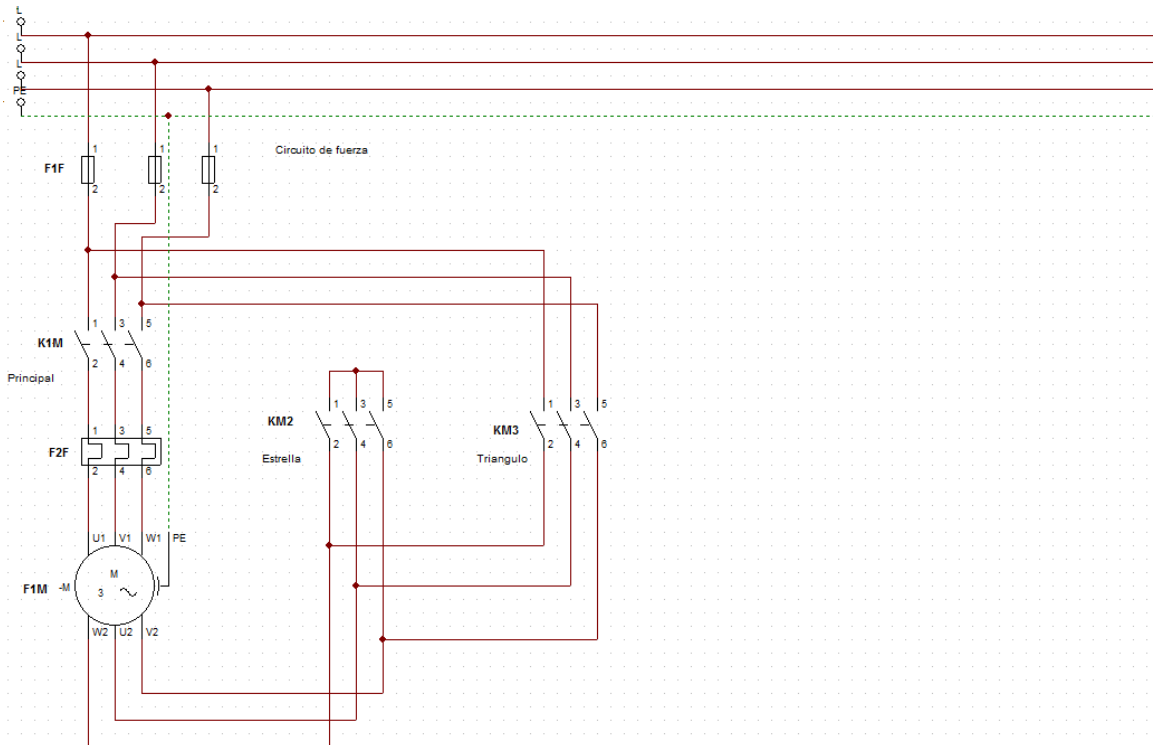


Fig.5.21 Circuito de fuerza arranque estrella-triángulo

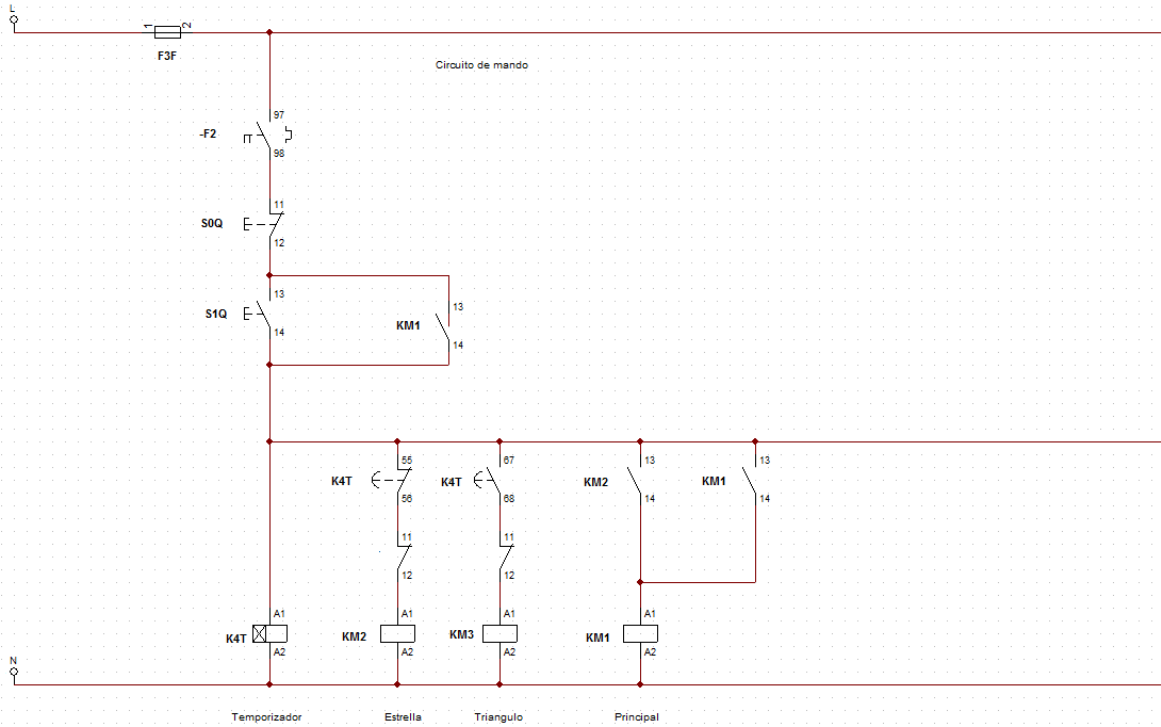
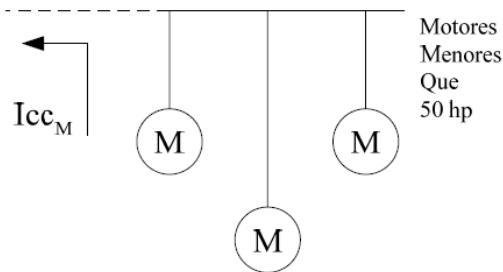


Fig.5.22 Circuito de mando arranque estrella-triangulo.

5.6.2 Calculando la corriente de corto circuito aplicando el método directo motores (< 50 hp).

Cuando se realiza el análisis de la contribución de estos motores en un cortocircuito las normas ANSI establecen que no es práctico considerar cada motor pequeño por separado, pues es mejor combinarlos para cada situación obteniendo un valor equivalente aunque muchos estén en funcionamiento a carga parcial. Un factor multiplicador de 4 es utilizado a nivel industrial debido a que la contribución de estos motores en un cortocircuito decrece rápidamente a diferencia de los motores grandes y viene expresado en la siguiente fórmula:

$$I_{ccM} = 4 \times \Sigma I_N \text{ (todos los motores).}$$



Por lo tanto:

$$I_{CCM} = 4 * \frac{9.51KVA}{\sqrt{3} * 0.44KV} = 49.91 A.$$



5.6.3 Selección de elementos aplicando los criterios de selección.

Selección del fusible.

Para la selección de el fusible el principal criterio de selección es escogerlo de acuerdo a la corriente de corto circuito del motor, en este caso particular sería para 50 A

Selección de contactor principal y de triangulo

- Primer criterio de selección: selección del contactor principal y de triangulo deberá seleccionarse en base la norma AC-3 (IEC/EN60947-4-1) es decir con este factor de reducción ($\sim 0,58 \cdot I_n$).

$$0.58 * I_n$$
$$0.58 * 13.05A = 7.55A$$

Por lo tanto se elegiría para una corriente de 7.55A.

- Segundo criterio de selección para contactor principal y de triangulo: Tipo de corriente, tensión de alimentación de la bobina y la frecuencia. Para nuestro caso particular sería, corriente alterna, 440 V, 60HZ.
- Tercer criterio de selección para contactor principal y de triangulo: Potencia nominal de la carga.

En nuestro caso particular sería 10HP, que es la potencia nominal de nuestro motor.

Selección de contactor de estrella.

- Primer criterio de selección de contactor estrella: Según la norma (IEC/EN60947-4-1), el contactor estrella para un arranque de no más de 15 segundos debe seleccionarse con un factor de un tercio ($\sim 0,33 \cdot I_n$) de la corriente nominal del motor.

$$0.33 * I_n$$
$$0.33 * 13.05 A = 4.3 A.$$

Por lo tanto se elegiría para una corriente de 4.3 A.

- Segundo criterio de selección para contactor principal y de triangulo: Tipo de corriente, tensión de alimentación de la bobina y la frecuencia. Para nuestro caso particular sería, corriente alterna, 440 V, 60HZ.
- Tercer criterio de selección para contactor principal y de triangulo: Potencia nominal de la carga.

En nuestro caso particular sería 10HP, que es la potencia nominal de nuestro motor.



Selección de relé temporizador estrella- triangulo.

Para la selección de este elemento, se debe seleccionar un relé temporizador, es decir las principales marcas tiene relés especiales para realizar esta función (conmutación estrella- triangulo), sin la necesidad de agregarle al relé térmico el temporizador.

La selección de este se hace en base a:

- Amperaje, en nuestro caso particular será aplicando el factor de reducción ($\sim 0,58 \cdot I_n$), por lo tanto será para: 7.55A.
- Tensión: en nuestro caso particular sería; 220-240 V, 60HZ.
- Temporización: que según la norma (IEC/EN60947-4-1) debe ser para un rango no mayor a 15 segundos.

	Arranque directo	Estrella-triangulo	Arrancador suave	Convertidor de frecuencia
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> -Es el método más sencillo para arrancar un motor trifásico. -Es el método más barato. -Elevado par de arranque. -Arranque rápido. 	<ul style="list-style-type: none"> -Automatismo muy sencillo y barato. -Se utiliza mucho. -Reduce a 1/3 la corriente de arranque. -Produce menos fatiga en los devanados del motor. 	<ul style="list-style-type: none"> -Permite un aumento continuo y lineal del par. -Ofrece la posibilidad de una reducción selectiva de la corriente de arranque. -Puede controlar la rampa de parada mediante la reducción de la tensión. -Limita la intensidad de arranque. -Los esfuerzos mecánicos y eléctricos se reducen al mínimo. -Es utilizado también para obtener una parada suave. 	<ul style="list-style-type: none"> -Arranque continuo y sin escalones. -El equipo de control es estático, es decir, no tiene partes móviles. -Fiabilidad. -Optimización de procesos. -Estabilidad a altas velocidades con fluctuaciones en la carga. -Limitación de corriente ajustable. -Permite el control de la velocidad (frecuencia) del motor. -Eficiencia

Tabla 32 continuación



			<ul style="list-style-type: none">-Fiabilidad.-Menor necesidad de mantenimiento.-Facilidad de ajuste.	<ul style="list-style-type: none">energética.-Opción de cambio en el sentido de giro.
--	--	--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabla 32 continuación



Desventajas	<ul style="list-style-type: none">-Crea un estrés térmico en los devanados del motor.-Reduce la vida de los devanados de un motor.-La corriente de arranque es muy elevada.-Problemas eléctricos debidos a las tensiones y corrientes transitorias.	<ul style="list-style-type: none">-El par y la corriente de arranque disminuyen siempre en 1/3.-Debe utilizarse solo ante cargas de bajo par de arranque.-El paso a triángulo provoca un aumento espectacular de la corriente.-El paso a triángulo provoca un aumento espectacular de la corriente.-Caídas de tensión en sistemas de suministro de red poco fiables o débiles.-El motor debe estar preparado físicamente para La conexión estrella-triángulo.	<ul style="list-style-type: none">-No siempre es posible utilizarlo para aplicaciones de accionamiento que requieren desde el principio un par elevado del motor.	<ul style="list-style-type: none">-Necesita una gran inversión inicial.-Las medidas adicionales sobre la instalación (cables blindados y filtro RFI para la compatibilidad electromagnética, EMC)
--------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabla 32 Comparación de ventajas y desventajas de los tipos de arranque más usados.



Arrancadores manuales.	Arrancadores automáticos.
<p>Ventajas.</p> <ul style="list-style-type: none">-Son más sencillos que los automáticos tanto en construcción como en mantenimiento.-No se necesitan ni acoplamientos eléctricos ni relés, y existe menor posibilidad de averías.-Los arrancadores manuales son más compactos y de menor peso que sus equivalentes automáticos de la misma potencia.-Los arrancadores del tipo tambor y de levas pueden ser completamente-Protegidos y su ejecución estanca o a prueba d explosiones. Por tanto, son menos susceptibles de deteriorarse, a causa de la humedad y el polvo, que los arrancadores automáticos.-Los costes iniciales y de mantenimiento de los arrancadores manuales son menores que los de los automáticos.-El tiempo que necesita para la secuencia de conexión puede variarse por el operario para acomodarla a las condiciones particulares de la carga acoplada al motor.	<ul style="list-style-type: none">-Los arrancadores automáticos no cansaran a un operario durante los ciclos frecuentes de arranque-parada y, por tanto, este se inclinara por parar el motor cuando no esté en servicio, reduciendo la carga eléctrica.-Los arrancadores automáticos no están limitados en magnitud física como están los manuales, por la fuerza humana que necesita para su manejo en secuencia de conexión.-Tanto el operario como las unidades de contactos momentáneos de control pueden estar separados del arrancador por lo que aquel queda protegido por intervenir a distancia.-Las pequeñas unidades de pulsadores son más fácilmente situadas en espacios confinados accesibles que los arrancadores de tambor o levas.-Existe menor peligro de ruptura interna y menos necesidad de ventilación interior en los arrancadores automáticos.-Los errores humanos quedan eliminados y el motor puede ponerse en marcha por un operario inexperto en un mínimo espacio de tiempo.-Una mayor solidez y cierre magnético más seguro, con menor tendencia a la vibración.-Permite la aplicación de constantes de tiempo inductivas y capacitivas para posibilitar un adecuado retardo, así como dispositivos tales como ignitrones y rectificadores controlados de silicio.

Tabla 33 continuación



Desventajas.	
<p>-El tamaño de los arrancadores accionados manualmente.</p> <p>-Los arrancadores más grandes presentan gruesos contactos y se necesita un mayor esfuerzo para hacer girar la manivela.</p> <p>-Llega a fatigar al operario si se utiliza con frecuencia y continuamente.</p> <p>-Debido a su limitado volumen, la posibilidad de formación de gases ionizados a causa de conexiones frecuentes en el interior del recinto cerrado puede conducir a descargas disruptivas y deterioros internos y extensos.</p> <p>-En aquellos casos en que se realice una operación a distancia desde un sitio cerrado, el regulador de conexión necesita más espacio que una unidad de pulsadores que se utiliza para un arrancador magnético automático.</p>	<p>-No es de fácil ajuste.</p> <p>-La secuencia temporizada es totalmente independiente de la corriente de carga y de la velocidad del motor</p> <p>-Los relés son difíciles de ajustar para proporcionar la acción deseada a tensión y velocidad adecuadas para las condiciones de carga.</p> <p>-Su funcionamiento está sujeto al adecuado ajuste de valores tales como, tensión, corriente, velocidad de arranque.</p>

Tabla 33 Comparación de ventajas y desventajas de Los arrancadores magnéticos (manuales y automáticos).



CONCLUSIONES.

- Existen muchos factores que se deben considerar a la hora de seleccionar un motor eléctrico, pues repercuten en la instalación, la operación y el mantenimiento.
- Los elementos eléctricos necesarios para realizar control de nivel industrial a motores eléctricos, están disponibles en el mercado en diferentes marcas y cuyos precios generalmente son altos y van unidos a la marca, certificaciones nacionales e internacionales de los mismos.
- Los elementos eléctricos para realizar control a motores eléctricos presentan características operativas muy diferentes acorde con los requerimientos de los motores. Estas condiciones operacionales deben imperar en la selección de los mismos buscando un funcionamiento seguro del sistema.
- Los elementos eléctricos son seleccionados mediante la utilización de catálogos suministrados por las empresas proveedoras. Estos catálogos suministran información técnica necesaria tal como cantidad y tipo de corriente, tensión, resistencias eléctricas, número y normalidad de la posición, material y demás datos operativos y estructurales.
- El mercado de los motores eléctricos es bastante amplio en marcas y costos, influyendo en este el factor de confiabilidad que se requiere en el motor, así como las características operativas del sistema eléctrico de alimentación y los requerimientos de entrega del motor.
- 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 un motor estándar
- El uso y la aplicación determinan la selección del modo de arranque para un motor trifásico asíncrono.
- Comparamos los rasgos característicos de los modos de arranque
- Se ha verificado que en el ámbito de los motores eléctricos, comercialmente el motor de mayor aplicación es el motor tipo jaula de ardilla, debido a sus altas prestaciones de torque y durabilidad bajo condiciones de trabajo pesadas.
- Teniendo en cuenta la economía en los costos de operación de un motor, es más eficiente trabajar con motores de alimentación trifásica, debido a que consumen menos corriente que sus similares monofásicos a igual potencia.
- En el arranque directo en estrella que es el más común, el pico de corriente es reducido. Esta situación se aprovecha en el arranque para generar bajos costos operativos en arranques periódicos además de que se genera menos caída de voltaje en las redes que alimentan a los motores.
- Las principales ventajas de los arrancadores automáticos en comparación con los manuales es, un menor tamaño, menos necesidad de ventilación en el interior del arrancador, el más importante es que los errores humanos quedan eliminados.
- La principal desventaja de los arrancadores automáticos en comparación con los manuales es, que el ajuste de estos para lograr las condiciones



deseadas en el arranque, es complicado.

- En el arranque con montaje estrella triángulo el pico de corriente es bajo comparado con la corriente nominal del motor en triángulo, bajo estas condiciones este tipo de operación es más eficiente que la operación directa en estrella o triángulo.
- En el arranque con montaje estrella triángulo y un tiempo de conmutación cercano a cero segundos, el pico de corriente es bastante alto debido a la alta corriente nominal que requiere para su operación en triángulo.
- En el arranque con montaje estrella triángulo y con un tiempo de conmutación largo tarado en el dial del temporizador, el pico de corriente es bajo debido a la baja corriente nominal al arrancar en estrella.
- Los circuitos de comando de las operaciones de control de motores eléctricos deben manejarse en la medida de lo posible en bajos voltajes utilizando cableado de menor sección y generando seguridad para el operador. Con posibilidad de operar desde puntos remotos el motor sin entrar en contacto con los voltajes y corrientes de trabajo.
- 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.
- El convertidor de frecuencia es en última instancia, la mejor solución para un arranque continuo y sin escalones de motor asíncrono trifásico. La limitación de corriente ajustable evita los picos de corriente en el suministro de red eléctrica y repentinas cargas en las partes mecánicas de la máquina y en los sistemas.
- El convertidor de frecuencia también permite el control de la velocidad (Frecuencia) del motor. Considerando que los motores estando conectados directamente a la red eléctrica sólo pueden lograr las condiciones ideales de funcionamiento en el punto de estado de funcionamiento constante (= indicación de la placa de características), pueden ser utilizados en todo el rango de velocidades con el control de frecuencia, por ejemplo, desde 4V a 0,5Hz a 400V 50/60Hz. La relación constante de voltaje / frecuencia (V/f) garantiza puntos independientes que operan con el par nominal de la carga (M_M).
- Los arrancadores magnéticos manuales, son baratos, sencillos en construcción y mantenimiento, presenta algunas desventajas tales como: son de un tamaño grande, es susceptible a errores humanos y en él se produce un gran desgaste mecánico.
- Los arrancadores magnéticos automáticos eliminan el factor (error humano) en sus fallas, menor tamaño que los magnéticos manuales, permite la aplicación de constantes de tiempo inductivas y capacitivas para posibilitar un adecuado retardo, una mayor solidez y cierre magnético más seguro, con menor tendencia a la vibración, como desventajas la principal es, su funcionamiento está sujeto al



adecuado ajuste de valores tales como, tensión, corriente, velocidad de arranque, los elementos que lo constituyen son de difícil ajuste esto provoca que sea complicado obtener los resultados deseados.

•Una adecuada selección de un arrancador de debe tomar en cuenta:

- Costo
- Par de arranque del motor a controlar
- Funciones adicionales que realiza aparte del arranque(control de velocidad, limitación de corriente)
- Facilidad de ajuste
- Exactitud
- Tipo de carga (para el que se requiere)



Bibliografía.

- CHAMPAN, Stephen J. "Maquinas Eléctricas" Ed. McGraw-Hill; Trad. Rozo Castillo, Eduardo; Bogotá, Colombia: 2000
- Energy Management Guide For Selection and Use of Fixed Frequency Medium AC Squirrel- Cage Polyphase Induction Motors, NEMA Standards Publication MG 10-2001 (R2007).
- Frailes, J. (2008). *Máquinas Eléctricas*. España: Mc Graw Hill.
- GE Industrial Systems. *AC Motor Selection and. Application Guide*.
- Irving L Kosow "Maquinas Eléctricas y Transformadores" Editorial Prentice Hall
- Walter N. Alerich, "CONTROL DE MOTORES ELECTRICOS", Editorial Diana.
- Gilberto Enríquez Harper, "Fundamentos de control de motores eléctricos en la industria Editorial", Limusa, 1999.
- Gilberto Enríquez Harper, "El ABC de las máquinas eléctricas", Editorial Limusa, 1988.
- Irving L Kosow "Control de máquinas eléctricas", Editorial Reverte, 1993.

Sitios de consulta web

www.weg.com.mx

<http://www.abb.com.mx/>

<http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448169263.pdf>

www.eatonelectric.es

<http://es.scribd.com/doc/174057362/lyCnet-Simbologia-y-Esquemas-Motores>

<http://mx.rockwellautomation.com/>

<http://es.scribd.com/doc/137726554/Motores-Electricos-INACAP>

<http://www.reitec.es/V2/Pdf/documentacion6.pdf>