

308917 8
24

UNIVERSIDAD PANAMERICANA

ESCUELA DE INGENIERIA
CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



MAQUINAS ELECTRICAS ROTATIVAS Y PROYECTO
TABLERO DE CONTROL DE MAQUINAS ELECTRICAS.

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
AREA: INGENIERIA MECANICA
P R E S E N T A :
MIGUEL ANGEL DORADO HUITRON

DIRECTOR DE TESIS: FIS. MARIANO ROMERO VALENZUELA

MEXICO, D. F.,

1999

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A DIOS
A MIS PADRES
A ROSINA
A ANDRÉS Y CATALINA

I N D I C E

	página
Introducción.....	3
Capítulo 1 Teoría electromagnética y las máquinas eléctricas rotativas.....	5
1.1 Teoría electromagnética.....	6
1.2 Máquinas eléctricas rotativas.....	10
1.3 Máquinas eléctricas de corriente directa....	10
1.4 Máquinas eléctricas de corriente alterna....	13
1.5 Motores monofásicos o fraccionales.....	17
1.6 Máquinas síncronas.....	19
Capítulo 2 Protección y control.....	21
2.1 Protección.....	22
2.2 Control.....	24
Capítulo 3 Circuitos de control.....	40
3.1 Regulación de la velocidad de los motores de C.C.....	42
3.2 Regulación de velocidad y arranque de los motores de C.A.....	43
3.3 Circuitos de control de motores de C.C.....	45
3.4 Circuitos de control de motores de C.A.....	50
3.5 Control de las máquinas síncronas.....	68
Capítulo 4 Proyecto de construcción del tablero de control de máquinas eléctricas.....	77
4.1 Resumen y usos de las máquinas de C.C.....	78
4.2 Consideraciones sobre la aplicación de motores de C.A.....	79
4.3 Identificación del equipo.....	81
4.4 Proyecto de tablero y mesa de montaje.....	86
4.5 Material y equipo.....	94
Conclusiones.....	98
Bibliografía.....	100
Notas aclaratorias.....	102
Tablas diversas.....	104

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas a que se enfrenta la mayoría de los egresados universitarios que han concluido sus estudios en áreas técnicas, es su poco contacto con la práctica de su especialidad. Tal situación es notable a nivel nacional y particularmente importante en el caso de la ingeniería electromecánica que demanda una buena experiencia práctica.

Tomando en cuenta lo anterior y considerando las necesidades particulares de la Escuela de Ingeniería de la Universidad Panamericana, se presenta este trabajo que consiste en un proyecto para la construcción de un tablero que permita realizar algunas prácticas de control de máquinas eléctricas. Se inicia con la teoría básica del funcionamiento de una máquina eléctrica indicando los conceptos que sirven como soporte de la teoría electromagnética relacionada directamente con la operación de un dispositivo electromecánico.

Una vez mencionadas las bases teóricas, se considera su aplicación práctica para motores y generadores eléctricos. Se sabe que existen dos formas de presentación de la energía eléctrica, según su variación en el tiempo y que son en forma continua o constante (también llamada directa), y en forma variable o alterna (casi siempre senoidal). Con ésta base se hace una división de las máquinas eléctricas para explicar por separado su funcionamiento según el tipo de alimentación. Se enuncia un tercer tipo que utiliza ambas señales y que se le conoce como síncrona. En la presentación de cada tipo se busca exponer en forma sencilla los parámetros más importantes del funcionamiento y algunas formas de determinarlos inclusive prácticamente.

En el capítulo 2 se hace un paréntesis para incluir el concepto de protección que es importante para cuidar de posibles riesgos de una mala operación de los equipos de control básicos y de los cuales se presenta una breve explicación de su funcionamiento, sus características y aplicaciones. Además se muestran dos tipos de elementos de control que son los electromecánicos y los de estado sólido.

En el capítulo 3 se indican una serie de circuitos con los cuales es posible realizar el control de los motores eléctricos; se hace hincapié en las formas de arranque por ser éste el más crítico para toda máquina. De hecho aunque es importante el período de funcionamiento con

carga, suelen presentarse la mayor parte de los problemas al momento del arranque, y para eliminar ciertos efectos, existen algunos métodos de los cuales se mencionan los más comunes.

Por último, en el capítulo 4 se hace referencia al proyecto de tablero para alojar los elementos de control que se propone utilizar en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas; se pretende darle utilidad a la mayor parte del equipo que ya se tiene a fin de hacer más factible el proyecto.

CAPÍTULO 1
TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA
Y
LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS.

1.1. TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA.

1.1.1. CAMPO MAGNÉTICO.

Es posible definir el campo magnético en cualquier punto como un vector representado por el símbolo "B" (INDUCCIÓN MAGNÉTICA) cuya dirección se especifica por la orientación a la que apuntaría el polo norte de la aguja de una brújula cuando se coloca en ese punto; la magnitud de B puede definirse en términos del momento de torsión que se ejerce sobre la aguja de una brújula; gráficamente se representa por las líneas de inducción. El número de líneas de inducción está en relación directa con la magnitud del campo magnético.

El flujo magnético se define matemáticamente como la suma continua del producto de la componente normal del campo magnético sobre un diferencial de superficie:

$$\text{EC. No. 1} \quad \phi_m = \int \vec{B} \cdot \vec{ds}$$

En el caso de que se tenga una superficie cerrada, el flujo magnético será cero. Esto es una relación importante, pues establece la no existencia de polos magnéticos aislados.

$$\text{EC. No. 2} \quad \phi_m = \oint \vec{B} \cdot \vec{ds} = 0$$

Por otro lado, si ahora se tiene un flujo de electrones confinado en un conductor eléctrico en presencia de un campo magnético, aquéllos también estarán sujetos a una fuerza y dado que los electrones no pueden salirse del conductor, en consecuencia éste estará sujeto a dicha fuerza. Matemáticamente esto se expresa de la siguiente forma:

$$\text{EC. No. 3} \quad \vec{F} = \vec{L} \times \vec{B}$$

"L" indica la dirección de la corriente y es la longitud del alambre que está dentro del campo magnético.

A la ecuación No.3 se le conoce como la Ecuación de Fuerza de Lorenz.

1.1.2. EFECTO DEL CAMPO MAGNÉTICO SOBRE UNA ESPIRA CON CORRIENTE ELÉCTRICA.

Si ahora se tiene una espira de alambre con corriente eléctrica dentro de un campo magnético, se verá que cada parte de la espira sufrirá un momento torsional cuyo valor y magnitud se puede conocer aplicando la ecuación No.3. obteniéndose la siguiente expresión:

$$\text{EC. No. 4} \quad \vec{T} = (Nai) \vec{U} \times \vec{B}$$

donde N es el número de espiras, A el área de la espira, i es la intensidad por el conductor de la espira, y $\vec{U}$ es el vector unitario normal a A y que forma un ángulo θ con B .

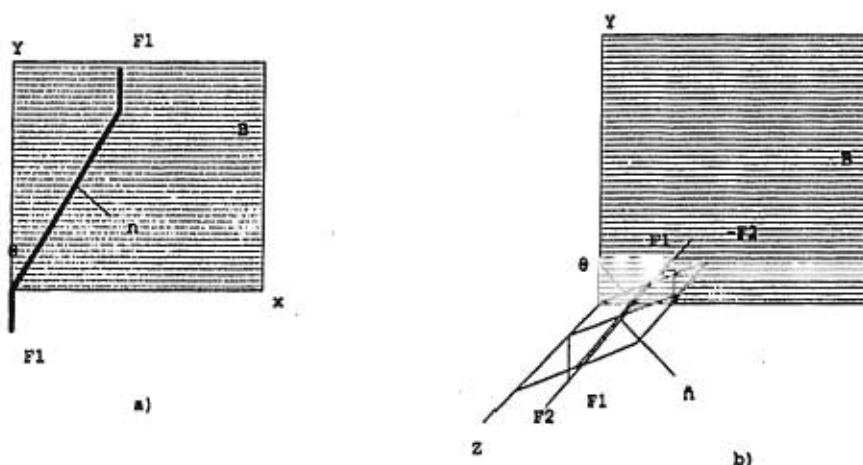


FIG.1.1. Esquema de una espira rectangular expuesta a un campo magnético B en un plano tridimensional (b) y su proyección en el plano XY.

1.1.3. LEY DE AMPERE Y LEY DE BIOT-SAVART.

Ambas leyes son experimentales y establecen la forma de obtener la magnitud del campo magnético que resulta de un flujo de electrones estables.

Se encontró que al alejarse del conductor eléctrico por el que fluye una corriente de electrones, el campo magnético disminuye; mientras que al acercarse a dicho conductor, el campo aumenta. A la vez, se observó que al aumentar la intensidad de la corriente en el conductor, se aumentaba el campo magnético, y cuando se disminuía, la intensidad del campo magnético era menor. De esta forma se concluye que el campo es directamente proporcional a la intensidad e inverso a la distancia del punto en cuestión. Esto es la ley de Ampere y se expresa así:

$$\oint \vec{B} dL_x = \mu^0 i$$

donde μ^0 es la constante de permeabilidad en el vacío, y tiene el valor de $\mu^0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (tesla-mt-ampere). Tesla es la unidad del campo magnético en unidades MKS, dL_x es perpendicular al radio y representa un diferencial de la distancia al punto X.

1.1.4. FUERZA ELECTRODINÁMICA ENTRE DOS CONDUCTORES PARALELOS.

Cuando se tiene un conductor por el cual fluye una corriente eléctrica, se produce un campo magnético alrededor de él provocado por dicha corriente. Ahora bien, si se tienen dos conductores colocados paralelamente a una distancia d , y cada uno con un flujo de corriente i , se tendrá un campo magnético en cada uno, producto de dicha intensidad y que se hará presente en el otro conductor. Al tenerse estas condiciones, ambos estarán sujetos a una fuerza de magnitud:

$$\text{EC: No. 6-a} \quad F_1 = i_1 \cdot L_1 \cdot B_{12} \quad : \quad F_1/L_1 = (\mu^0 i_1 i_2) / 2\pi d$$

$$\text{EC. No. 6-b} \quad F_2 = i_2 \cdot L_2 \cdot B_{21} \quad : \quad F_2/L_2 = (\mu^0 i_2 i_1) / 2\pi d$$

donde se tiene que la fuerza por unidad de longitud es la misma para ambos conductores. La dirección puede ser fácilmente determinada por la regla de la mano derecha.

Este hecho es fundamental pues es una de las bases para el funcionamiento de los motores eléctricos. La otra es la ley de inducción de Faraday.

1.1.5. LEY DE FARADAY.

Esta ley expresa la relación que existe entre un campo magnético, y un voltaje inducido en las terminales de una bobina que enlaza las líneas de dicho campo.

Experimentalmente se observa que cuando se tiene una bobina en cuyas terminales se conecta un galvanómetro, y se expone a un campo magnético, por ejemplo el emitido por un imán, resulta una desviación en el galvanómetro lo que puede entenderse como producir una corriente en la bobina. Sólo que este efecto se obtiene nada más cuando el campo magnético está en movimiento. Si se modifica la magnitud de campo magnético se verá que la intensidad de corriente producida también se modificará. Por otro lado, mientras más rápido sea el movimiento de acercar el imán a la bobina, mayor será la corriente registrada por el galvanómetro. A la vez, a mayor número de espiras, mayor será dicho registro y lo mismo sucede si se usa una bobina con mayor sección transversal.

Ahora, si en lugar de un imán se tiene otra bobina por la que esté circulando una corriente y la cual se pueda controlar, y como lo explica la ley de Ampere se tendrá también un campo magnético asociado a dicha bobina y así se podrá tener el mismo efecto que el producido por el imán. Lo anterior se puede resumir en la siguiente expresión conocida como la ley de inducción de Faraday:

$$E.C. \text{ No. } 7 \quad E = - (d\Phi B / dt) * N$$

donde E es la fuerza electromotriz inducida, y $d\Phi B / dt$ es la razón de cambio del flujo magnético con respecto al tiempo. N representa el número de espiras en la bobina. En cuanto al signo menos, existe una razón conocida como Ley de Lenz y que trata acerca de la dirección de las fuerzas electromotrices inducidas y sus corrientes. Esta ley se expresa de la siguiente forma: La corriente que es inducida en un circuito tendrá una dirección tal que producirá un efecto opuesto a la causa que la produce(1). Esto tiene cierta relación con el principio de la conservación de la energía.

De entre las aplicaciones más comunes de la ley de Faraday se encuentran las siguientes: en los generadores eléctricos de corriente alterna, en el Betatrón (acelerador de electrones), y en los motores y generadores de inducción.

1.2. MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS.

Las máquinas eléctricas creadas actualmente pueden agruparse en dos tipos: Máquinas eléctricas rotativas y las estáticas. El propósito de este trabajo consiste en el control de algunas de las primeras las que a su vez pueden subdividirse en:

- a) Según el tipo de alimentación: de corriente continua y de corriente alterna;
- b) Según su propósito: en convertidores de energía mecánica en eléctrica o de energía eléctrica en mecánica. A las primeras se les llama generadores y a las segundas motores;
- c) Según su tamaño: en esto existe una gran variedad según el equipo para el cual funcionen y se miden en Hp o Watts.

A continuación se tratará de abarcar las dos primeras subdivisiones con el fin de familiarizarse con sus características de funcionamiento. Sin embargo hay que tener en cuenta que de alguna forma la teoría básica es común. En el caso de los motores el principio de repulsión magnética de dos polos idénticos se maneja, y en el caso de los generadores lo es la ley de inducción de Faraday.

1.3. MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS DE CORRIENTE DIRECTA.

CONSIDERACIONES GENERALES.

Una de las ventajas de las máquinas de corriente directa (C.C.) es que se pueden usar como generadores y como motores; y de hecho en construcción son muy similares, salvo las características de protección (cubiertas, sellos, etc.) que las determinan el lugar donde esté funcionando.

Desde el punto de vista electromagnético, la máquina está formada por dos fuentes de excitación magnética, acopladas mediante un circuito magnético. Los dos sistemas principales de excitación son:

- a) El campo o sistema de excitación estático que se ubica en el estator y que puede ser un imán permanente o un devanado eléctrico.
- b) El devanado de armadura, localizado en el rotor.

El circuito magnético consiste en: el material magnético dúctil (o imanes permanentes) y el yugo que por lo regular forma parte de la coraza de la máquina.

Desde el punto de vista eléctrico la máquina está formada por:

- a) El estator cuyos componentes principales son los arrollamientos de campo (devanado eléctrico) y el circuito magnético formado normalmente por núcleos de acero laminado.
- b) El rotor compuesto de un núcleo ranurado de acero laminado y en cuyas ranuras se encuentra el devanado de armadura, el cual está conectado con una fuente de excitación de C.C. a través del conmutador, el cual a su vez la hace en contacto con las escobillas montadas en la flecha sostenida en cojinetes o bujes y de la cual se obtiene o se suministra la energía mecánica.

Cabe aclarar que en el caso de los motores, el par electromagnético es en función de la corriente de devanado de armadura al que a menudo se le conoce como devanado de potencia de la máquina.

1.3.1. CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO.

Existen ocho formas de interconectar los circuitos de campo y armadura, los cuales se ilustran en la figura 1.2. El uso de la máquina de C.C. está más generalizado como motor, pero las formas anteriores pueden ser empleadas también para máquinas generadoras, siendo la más flexible la de excitación separada pues como se observa se puede obtener un control total de ambos circuitos y con ello se consigue una amplia variación de respuestas. Sin embargo, la más empleada es la configuración campo serie, sobre todo en motores de tracción o como motores universales para operación tanto en C.C. como en C.A.

Según la figura 1.3, puede observarse que es necesaria la existencia de un magnetismo residual el cual generará una diferencia de potencial (E_r), y cerrando el circuito de armadura campo, habrá una corriente que provocará un aumento en el campo magnético, y se incrementará voltaje y corriente sucesivamente.

En cuanto a la configuración compuesta acumulativa, aunque tiene las ventajas que ofrece la excitación en serie reunidas con la de excitación en paralelo (lo que implica la suma de campos magnéticos de ambos devanados), ha venido casi al desuso debido a las nuevas técnicas de control electrónico para los circuitos de armadura y de campo.

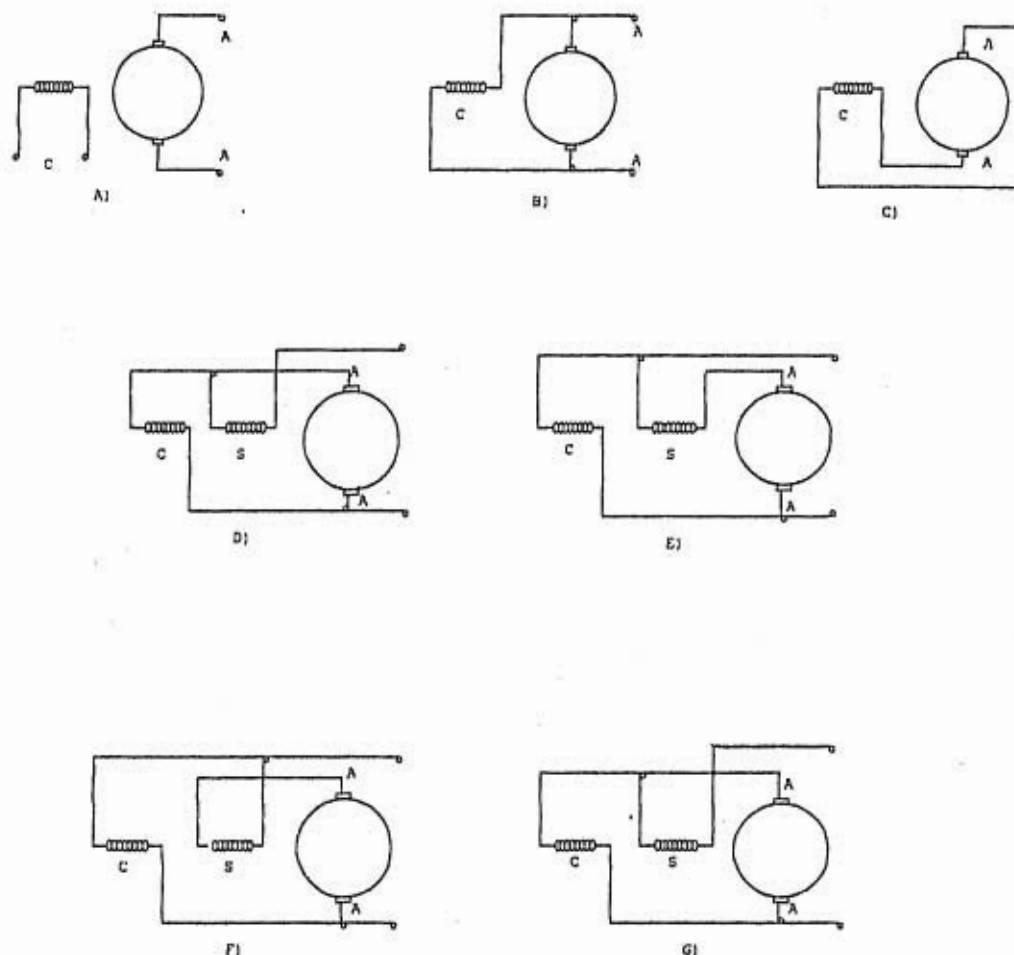


FIG.1.2 Clasificación de máquinas de C.D.: a) Excitada separadamente, b) En derivación, c) En serie, d) Compuesta acumulativa, e) Compuesta diferencial, f) En derivación larga, g) En derivación corta.

Por último, la configuración compuesta diferencial puede decirse que es el efecto de una incorrecta conexión de la compuesta acumulativa. En ella se produce la oposición de los campos serie y derivación de tal forma que

puede no existir flujo dentro del campo, ocasionando que la velocidad del motor llegue a ser peligrosamente alta, por lo que no es usada.

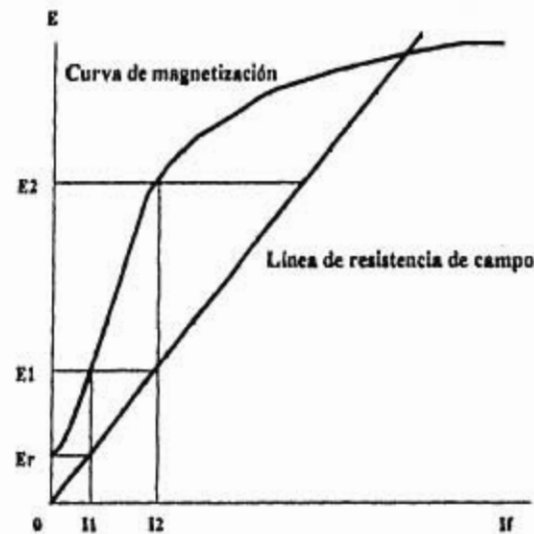


FIG. 1.3 Construcción de voltaje en un generador autoexcitado.

1.4. MÁQUINAS ROTATIVAS DE CORRIENTE ALTERNA.

CONSIDERACIONES GENERALES.

Aunque todas las máquinas eléctricas rotativas funcionan bajo los mismos principios(2), a este tipo de motor se le llama de inducción. En él, circulan corrientes alternas en el rotor y en el estator. El caso más simple es aquél en el que se aplican directamente al devanado del estator una corriente alterna y por inducción se tiene también una corriente en el rotor (como en los transformadores). Éste tipo de motores son de uso muy común pero prácticamente no son empleados como generadores pues sus características lo hacen inadecuado. En ocasiones se utilizan también como cambiadores de frecuencia. Según la característica del devanado del estator, éstos motores pueden ser monofásicos (con una sola señal senoidal de excitación), y polifásicos (varias señales); ésta última es

común que sea trifásica. En la práctica debido a los trastornos que causa en las líneas de alimentación, el motor monofásico rara vez es mayor de 1 H.P., mientras que los trifásicos por lo general superan este valor.

1.4.1. CAMPOS MAGNÉTICOS GIRATORIOS.

Para comprender bien la teoría de las máquinas de corriente alterna polifásica es necesario saber cómo es el campo magnético proveniente de un devanado polifásico. Para el caso, se verá cómo son las fuerzas magnetomotrices (f.m.m.) producidas por un devanado trifásico como el encontrado en el estator de una máquina trifásica síncrona o en una de inducción.

En estas máquinas los devanados correspondientes a cada fase están separados 120° eléctricos entre sí alrededor del entrehierro. Cuando en cada devanado hay dos polos, la separación espacial de la fase es también de 120° espaciales. Por consiguiente, las tres componentes de la f.m.m. están desplazadas 120° eléctricos en el espacio. Cada fase está excitada por una corriente alterna senoidal de magnitud variable en el tiempo y con un desplazamiento equivalente a 120° con la anterior, es decir:

$$\begin{aligned} \text{EC. No. 8a} & \quad i_a = I_m \cos(Wt) \\ \text{EC. No. 8b} & \quad i_b = I_m \cos(Wt - 120^\circ) \\ \text{EC. No. 8c} & \quad i_c = I_m \cos(Wt - 240^\circ) \end{aligned}$$

donde I_m es la intensidad máxima, siendo el origen del tiempo el instante en que la fase "a" presente su máxima intensidad positiva. En este caso la secuencia de fases es a-b-c.

Se sabe que la f.m.m. es función de la intensidad que la produce por lo que, para este caso, las constituyen ondas senoidales variables en el tiempo y distribuidas alrededor del entrehierro. Cada una de estas tres componentes puede representarse por un vector en el sentido del eje magnético de su fase correspondiente y de magnitud proporcional a su intensidad instantánea.

Para ilustrar un poco más lo anterior(3), y apoyándose en la figura 1.4, si se sitúa el origen de los ángulos θ en el eje de la fase "a", para un θ dado las tres fases contribuyen en la f.m.m. de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{EC. No. 9a} & \quad F(\theta)_a = F_a(\max) \cos(Wt) \cos\theta \\ \text{EC. No. 9b} & \quad F(\theta)_b = F_b(\max) \cos(Wt - 120) \cos(\theta - 120) \\ \text{EC. No. 9c} & \quad F(\theta)_c = F_c(\max) \cos(Wt - 240) \cos(\theta - 240) \end{aligned}$$

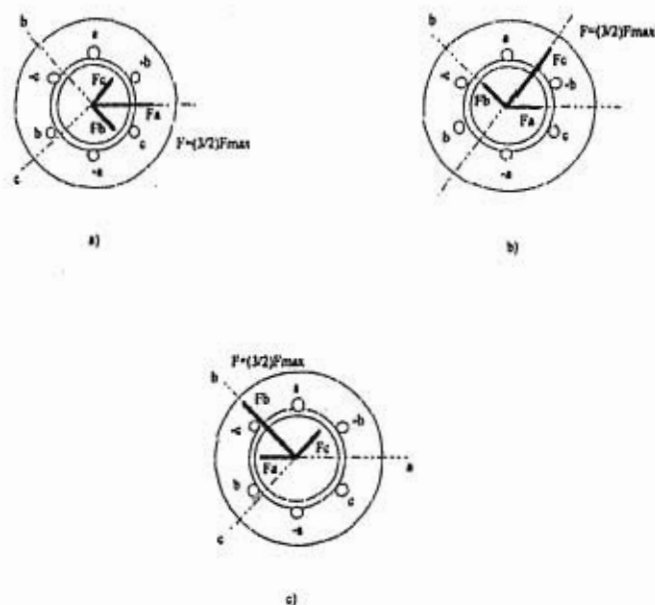


FIG.1.4 Demostración de la creación de un campo magnético rotativo por medio de corrientes trifásicas.

donde lo comprendido dentro de los corchetes es dependiente del tiempo. Después de algunos desarrollos, se obtiene:

$$\text{EC. No. 10} \quad F(\theta, t) = \frac{3}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t)$$

la cual es la expresión de onda de f.m.m.

Esta onda es una función senoidal del ángulo θ ; su amplitud es constante y su fase en el espacio viene dada por el ángulo ωt que es función lineal del tiempo. El ángulo ωt determina la rotación del campo completo alrededor del entrehierro a la velocidad angular uniforme ω , es decir, que en un momento t_x , la onda es una senoide en el espacio con su máximo positivo desplazado ωt_x radianes eléctricos del punto fijado como origen de 0, en otro momento posterior t_y el mismo máximo está desplazado ωt_y del citado origen, habiendo girado $\omega(t_y - t_x)$ alrededor del entrehierro. En el instante $t=0$, la intensidad en la fase "a" pasa por un máximo y la punta positiva de la onda de f.m.m. coincide con el eje de dicha fase; transcurrido un tercio del ciclo, es la intensidad en la fase "b" la que

pasa por su máximo y la punta positiva de la onda estará orientada según el eje de la misma, y así sucesivamente. En sí, se tiene el mismo efecto que el giro de un imán alrededor de un eje normal al mismo.

En forma general, la velocidad de sincronía de una máquina de "p" polos es:

$$EC. No. 11 \quad n = 120 \cdot f / p \quad (\text{rpm})$$

1.4.2 CRITERIOS DE OPERACIÓN.

La operación de un motor de inducción puede caracterizarse por los siguientes factores:

- 1.- Eficiencia,
- 2.- Factor de potencia,
- 3.- Par de arranque,
- 4.- Corriente de arranque,
- 5.- Par máximo.

Además, durante el diseño de una máquina se tienen presente las pérdidas por núcleo y las debidas a $I^2 \cdot r$ así como los medios para disipación de calor.

Sin embargo, todos estos factores están relacionados y sus variaciones afectan a los demás. Por ejemplo, la eficiencia es aproximadamente proporcional a $(1-s)$, siendo s el deslizamiento, de este modo este factor sería compatible con una carga que corriera a la velocidad más alta posible. Como la eficiencia depende de las pérdidas $I^2 \cdot r$, es de suponer que r_1 (resistencia del conductor del estator) debieran de ser pequeñas para una carga dada. Pero, por otro lado un par de arranque elevado se produce con una r_2 grande (resistencia del conductor del rotor); es decir, mientras más grande sea la resistencia del rotor, mayor será el par de arranque.

Para reducir las pérdidas por núcleo, la densidad de flujo operante (B), debe ser pequeña aunque esto impone un requerimiento conflictivo sobre la corriente de carga (I^2) puesto que el par, determinado por la carga depende del producto de B por I^2 . Entonces, el hecho de intentar reducir las pérdidas por núcleo más allá de un cierto límite se traduce en un aumento de las pérdidas $I^2 \cdot r$ para una carga dada.

De los circuitos equivalentes se observa que se puede mejorar el factor de potencia reduciendo las reactancias de

fuga y aumentando las magnetizantes. Sin embargo, no es prudente reducirlas a un mínimo, pues estas reactancias restringen a un mínimo la corriente de arranque del motor. Así pues, existe también cierto conflicto entre un alto factor de potencia y una corriente de arranque baja. Además, el par máximo será más elevado con reactancias de fuga más reducidas.

1.5. MOTORES MONOFÁSICOS O FRACCIONALES.

Básicamente un motor monofásico es un tercio de uno trifásico. Experimentalmente se comprueba lo anterior de la siguiente forma: si se tiene un motor trifásico jaula de ardilla, con sus devanados conectados a una fuente de alimentación trifásica y con baja carga, y de alguna manera se desconectan dos de sus tres devanados, manteniendo uno alimentado se ve que el motor continuará funcionando a velocidad casi igual, pero moviendo una carga menor (aproximadamente un tercio). Sin embargo, si ese mismo motor trifásico se tiene en reposo y se conecta sólo uno de sus devanados a la alimentación, se ve que no girará, aunque sí habrá inducción en el rotor. Para hacerlo girar bastaría sólo darle un ligero movimiento al rotor para conseguirlo.

Para iniciar el movimiento, es necesario producir un campo rotatorio, a través de un devanado auxiliar como divisor de fase, el cual producirá una segunda f.m.m., condición mínima para la existencia de un campo rotatorio. Existen diversos métodos para ello, algunos de los cuales son:

1.- Motor de fase partida. El devanado de marcha posee una resistencia relativamente baja y una alta reactancia. En cambio el devanado de arranque tiene alta resistencia y baja reactancia y además un interruptor centrífugo que opera al 75% de la velocidad final. Estas diferencias provocan que el ángulo de fase α entre ambas corrientes (I_m e I_a) sea diferente de cero (de 30° a 45°), existiendo un par:

$$EC. \text{ No. } 12 \quad T_s = K \cdot I_m \cdot I_s \cdot \sin(C)$$

En la figura 1.5 se muestran las características par-velocidad.

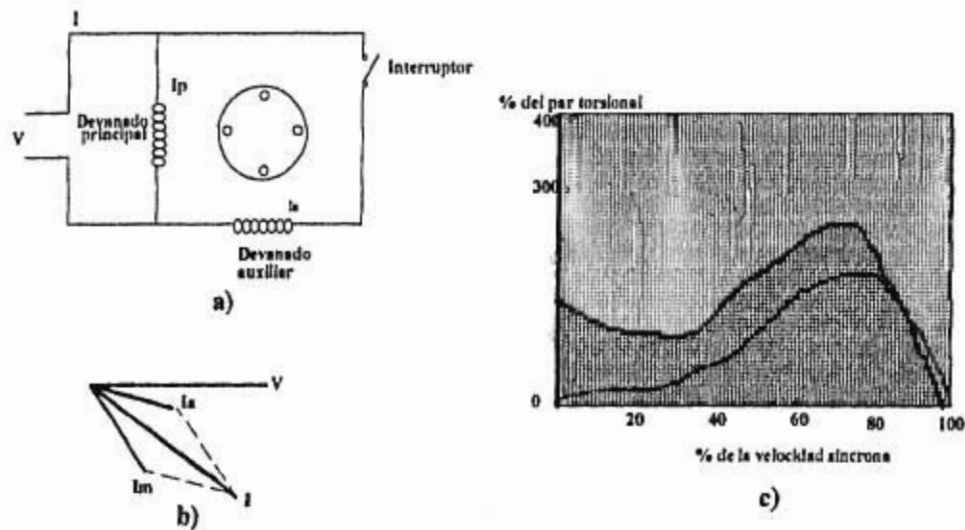


FIG. 1.5 Motor de fase partida. a) Esquema de conexiones, b) Diagrama vectorial en el arranque, c) Características típicas par-velocidad.

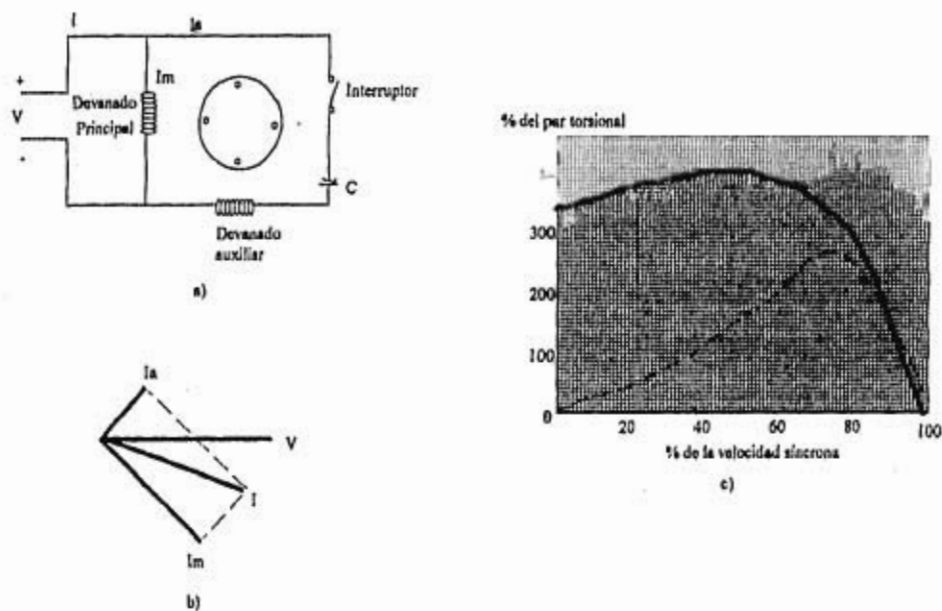


FIG. 1.6 Motor con arranque por capacitor. a) Esquema de conexiones, b) Diagrama vectorial en el arranque, c) Características típicas de par-velocidad.

2.- Motores con capacitor de arranque. La función del capacitor es la de aumentar el ángulo alfa (α) y para ello se conecta en serie con el devanado de arranque. Este tipo de motores, tiene la ventaja de poder fabricarse con potencias de hasta 10 Hp. El capacitor es del tipo electrolítico de bajo costo y se pueden alcanzar pares de arranque de hasta cuatro veces el nominal. En algunos motores, el capacitor junto con el devanado auxiliar o de arranque es desconectado al 75% de la velocidad nominal por medio de un interruptor centrífugo. En otros casos no son desconectados, lográndose las propiedades de par-velocidad mostradas en la figura 1.6.

3.- Motores con capacitor de arranque-capacitor de marcha. Uno de los capacitores se deja permanentemente en el circuito del devanado principal y el otro se desconecta con el interruptor centrífugo. Estos motores de hecho son motores de inducción bifásicos desbalanceados.

4.- Motores con espiras de sombra o de polos sombreados. Estos motores tienen normalmente polos salientes, una parte de los cuales está rodeada por un anillo de cobre que es lo que constituye la espira de sombra propiamente dicha. La corriente inducida en esta espira motiva que el flujo en la parte del polo por ella rodeada se retrase respecto al de la otra parte, resultando algo similar a un campo giratorio moviéndose en el sentido de la parte libre hacia la sombreada de cada polo, engendrándose así un par de arranque pequeño. Estos motores son los más económicos dentro de los monofásicos (llamados también de potencia fraccional), fabricándose normalmente hasta 1/20 Hp.

1.6 MÁQUINAS SÍNCRONAS.

1.6.1 CONSIDERACIONES GENERALES.

En la actualidad la mayor parte de la energía eléctrica es producida mediante generadores síncronos polifásicos. Estas máquinas se denominan síncronas porque operan a velocidades y frecuencias constantes bajo régimen estacionario. Al igual que las otras máquinas rotatorias, éstas también pueden operar como motores y como generadores. Sin embargo debido a que pocos mecanismos deben funcionar a velocidades fijas, estas máquinas encuentran su principal aplicación como generadores de corriente alterna operando a veces en paralelo con otras estaciones de potencia.

1.6.2 FUNCIONAMIENTO.

En el caso de utilizarse como motor, su principio de operación es muy sencillo. Como se recordará, al tenerse en el estator una señal de excitación trifásica se produce en él un campo magnético giratorio. Por otro lado, si se tiene en el rotor una alimentación de C.C. se producirá un campo magnético en él con polaridades definidas. Por el principio de alineamiento de campos magnéticos, se concluye que ambos campos, el de rotor y el de estator, tenderán a alinearse y por consiguiente habrá un par en el rotor girando con el campo magnético rotatorio del estator.

Sin embargo, si el rotor está en reposo, los polos del estator tenderán a hacer que el rotor gire en una dirección y en seguida en la otra, al girar ellos y barrer a través de los polos del rotor. Por consiguiente, un motor síncrono no arranca por sí solo. En la práctica, el rotor lleva barras amortiguadoras que actúan como la jaula en un motor de inducción, proporcionándose de esta forma un par de arranque; una vez arrancado el rotor y a medida que se aproxima a la velocidad síncrona, se orienta en posición con los polos del estator, emparejándose con su campo y girando a la velocidad síncrona.

Si ahora se considera como generador, su funcionamiento se basa también en la ley de Faraday. Si un conductor corta líneas de flujo magnético, se induce en él un voltaje. La fuente productora de ese flujo magnético es el rotor con sus devanados conectados a una fuente de C.D.. En la mayoría de los casos el rotor está acoplado a la máquina motriz y por consiguiente provoca que el flujo magnético tenga un movimiento respecto a los conductores inducidos. Si se tienen tres fases en el estator, que es lo común, el voltaje inducido será:

$$\begin{array}{ll} \text{EC. No. 13a} & V_a = V_m \cdot \text{Sen}(wt) \\ \text{EC. No. 13b} & V_b = V_m \cdot \text{Sen}(wt - 120^\circ) \\ \text{EC. No. 13c} & V_c = V_m \cdot \text{Sen}(wt + 120^\circ) \end{array}$$

siempre y cuando cada fase tenga el mismo número de espiras, longitud y radio y estén separados sus ejes en 120° .

CAPÍTULO 2
PROTECCIÓN Y CONTROL

2.1. PROTECCIÓN

En la actualidad, debido a los costos de inversión que representa todo tipo de instalaciones eléctricas, el papel que desempeñan los equipos de protección es de suma importancia para el buen funcionamiento de dicha instalación. Por ejemplo, en una central hidroeléctrica se suelen tener los siguientes tipos de protección para los generadores:

- Contra sobrecorrientes.
- Contra carga desequilibrada.
- Contra sobrecarga.
- Contra contactos entre espiras.
- Contra contactos a tierra en el rotor.
- Contra aumento de tensión.
- Protección diferencial del generador y contra contactos a tierra en el estator.
- Protección diferencial del bloque.
- Protección de impedancia.
- Protección de sobreintensidad para el generador piloto y equipos secundarios.

En el caso de los motores eléctricos, aunque algunas de las anteriores también son aplicables, en general debe decidirse si se requieren las siguientes características de protección, así como qué tipo debe de incluirse en cada instalación individual de control:

- a)** Protección contra campo abierto: algunos motores de C.C. pueden girar peligrosamente, con pérdida de la excitación de campo, mientras otros no pueden hacerlo debido a la fricción y al tamaño pequeño.
- b)** Protección contra fase abierta: la falla de una fase en un circuito trifásico puede producirse por un fusible fundido, una conexión abierta o una línea rota. Si ocurre la falla de una fase cuando el motor está en reposo, se originan corrientes en el estator y permanecerán a un valor muy alto debido a que el rotor está parado, y el calentamiento producido por las corrientes altas dañará con seguridad los embobinados. Si la falla sucede cuando el motor está en operación, habrá una reducción en la potencia y un calentamiento peligroso.
- c)** Protección contra inversión de fase: Si se intercambian dos fases de la línea de alimentación de un motor trifásico de inducción, éste invertirá su dirección de rotación con un resultado dañino para el equipo en caso de estar funcionando. Los relevadores de falla de fase y de inversión de fase, protegen a los motores y a lo accionado por ellos contra los riesgos de estas fallas.

d) Protección contra sobrevelocidad: en ciertos motores es posible que se desarrollen velocidades excesivas que pueden dañar el mecanismo accionado.

e) Protección contra inversión de corriente: la inversión accidental de la dirección de la corriente en los controladores complejos y sensibles para C.C. puede ser muy grave con la posible pérdida del control.

f) Protección contra cortocircuito: generalmente las protecciones contra cortocircuito se instalan en el mismo compartimiento que el medio de desconexión del motor, en especial para motores más grandes que los fraccionarios. Los fusibles que se instalan para este propósito, y los cortocircuitos son dispositivos de sobrecorriente que tratan de proteger los conductores del circuito derivado del motor, los aparatos de control de éste, y los motores contra sobrecorriente sostenida debida a cortocircuito, escapes a tierra y corrientes prolongadas y excesivas de arranque.

g) Protección contra sobrecarga: ésta es muy necesaria para evitar daños en los devanados y asegurar una vida útil mayor del motor, ya que si se permite, pueden funcionar con una salida mayor de su capacidad nominal. Se puede originar una sobrecarga en el motor, al sobrecargarse la maquinaria impulsada, por un voltaje bajo en la línea, o a causa de una línea abierta en un sistema polifásico resultando en operación monofásica. Bajo cualquier condición de sobrecarga, un motor toma una corriente excesiva que causa el sobrecalentamiento.

Como el aislante del devanado del motor se deteriora cuando se somete a sobrecalentamiento, existen límites establecidos para las temperaturas de operación del motor. Para protegerlo, se emplean relevadores de sobrecarga en un arrancador para limitar a cierto valor predeterminado la cantidad de corriente que toma. Ésta es la protección contra sobrecarga o de marcha. Los relevadores de sobrecarga de un arrancador funcionan para impedir que un motor tome corriente excesiva que pueda destruir su aislante. Los elementos térmicos o magnéticos, sensibles a la corriente, de los relevadores de sobrecarga, se conectan ya sea directamente en las líneas del motor o indirectamente a ellas a través de transformadores de corriente (T.C.). Los relevadores de sobrecarga actúan para desconectar el arrancador y parar el motor cuando toma una excesiva corriente.

Dado que es más común esta protección se han desarrollado varios tipos de mecanismos para este fin. De esta forma, se tiene que los más empleados son:

- + Unidades térmicas de aleación fusible.
- + Relevadores bimetalicos de sobrecarga.
- + Relevadores magnéticos de sobrecarga también accionables cuando la corriente baje a cierto valor predeterminado.
- + Relevadores de límite de tiempo del tipo de sobrecarga. Contiene un amortiguador que evita el disparo rápido causado por sobrecargas momentáneas, o corrientes de arranque.
- + Relevadores de corriente de disparo instantáneo; útil cuando el atascamiento del mecanismo accionado provoca altas corrientes.
- + Interruptores termomagnéticos, usados cuando se alimentan directamente pequeños motores. Constan de un sistema combinado o de un elemento térmico y un elemento magnético.

2.2 CONTROL.

2.2.1 GENERALIDADES.

El objeto de un sistema de control es regular uno o más parámetros de entrada de un motor con base en los parámetros de salida. Las características específicas del motor, esto es las que relacionan a las cantidades eléctricas de entrada con las mecánicas de salida, son importantes para el análisis y diseño del control. Básicamente existen dos métodos de controlar cualquier motor: el que emplea los dispositivos electromecánicos y el de los circuitos electrónicos. Sus características generales son:

1.- La capacidad térmica de los dispositivos electromecánicos es mayor y pueden soportar sobrecargas de temperatura durante períodos de minutos. Los semiconductores tienen constantes de tiempo térmicas muy cortas que a menudo duran menos de un segundo. También tienen trayectorias de conducción térmica naturales muy pobres y en muchas aplicaciones requieren disipadores de calor.

2.- Las características de sobrecarga de corriente en los dispositivos semiconductores son de capacidad relativamente pequeña. En cambio los motores soportan sobrecorrientes mientras no excedan las capacidades térmicas, y pueden diseñarse para operaciones periódicas de corriente de avalancha elevada.

3.- Muchos semiconductores están limitados por la razón de cambio de corriente; en cambio un dispositivo electromecánico no tiene una limitación equivalente.

4.- Los circuitos semiconductores son muy susceptibles a la interferencia electromagnética, tanto conductiva como inductiva, pero a los mecanismos electromecánicos nunca se les afecta de esta manera. Esto suele eliminarse con blindajes y otras protecciones.

5.- Los semiconductores son mucho más sensibles a golpes y vibraciones que los electromecánicos. No obstante, con montajes y embalajes adecuados, es posible aplicar los semiconductores en la mayoría de los niveles de vibración.

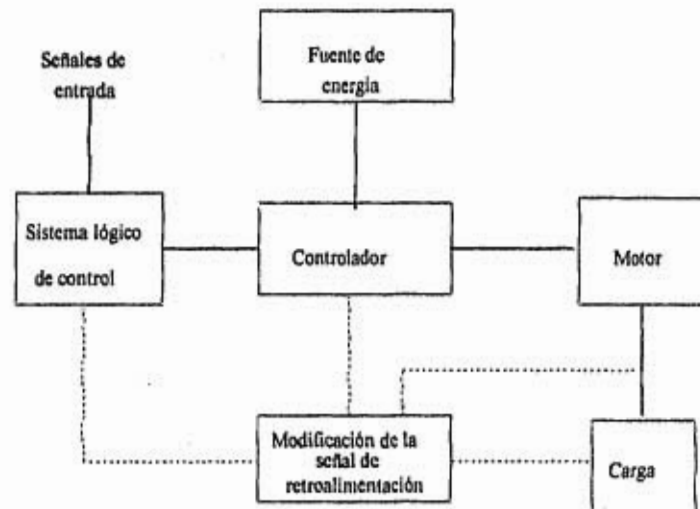


FIG. 2.1. Flujo general de señal en control electrónico de motores.

6.- Tradicionalmente los motores se operan de manera que conduzcan a formas de onda de corriente y voltajes uniformes, como la corriente continua estacionaria o la corriente alterna senoidal. Estas formas es posible obtenerlas fácilmente por métodos electromecánicos. En cambio cuando se controla mediante sistemas semiconductores, las formas de onda son menos regulares y frecuentemente discontinuas o no uniformes con frentes de onda que se elevan con brusquedad; este tipo de formas de onda tienen diversos efectos en las pérdidas del motor o características de excitación y en ciertos casos implican modificaciones del diseño del motor.

7.- El manejo de energía inductiva durante la acción rápida de conmutación de los dispositivos semiconductores es un problema fundamental del diseño en el control electrónico de motores, pues se pretende evitar los picos de voltaje y

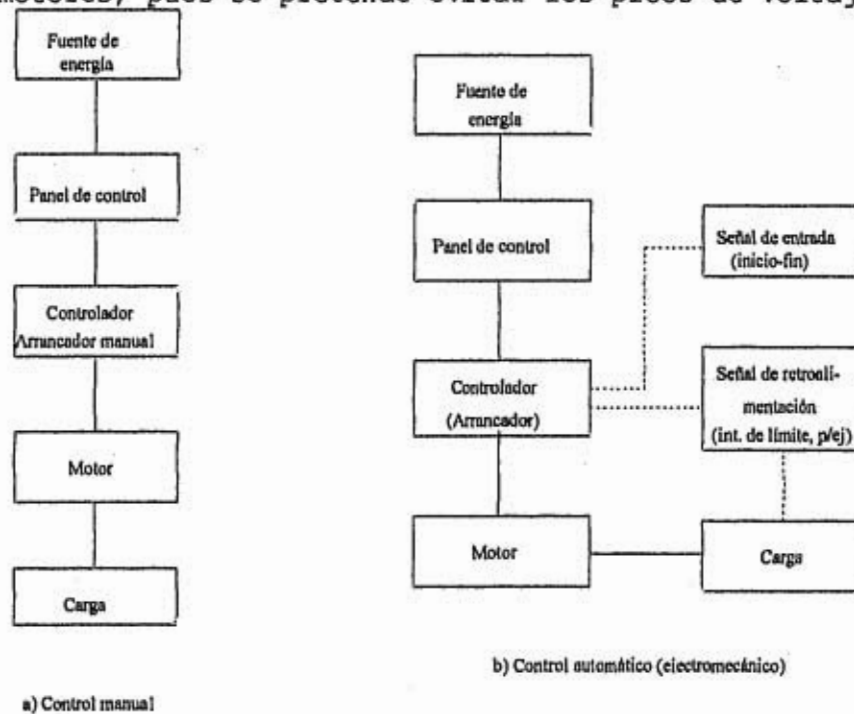


FIG. 2.2. Flujo general de control electromecánico de motores.

valores excesivos de corriente que puedan dañar los dispositivos.

Refiriéndose al bloque denominado controlador en las figuras 2.1. y 2.2, se dirá que existen diversos factores que deben tomarse en cuenta al seleccionar e instalar el sistema adecuado, tales como:

- a) Arranque.** Se refiere a que si la máquina se conectará directamente a la línea o si debe de arrancar lenta y gradualmente, evitando oleadas grandes de corriente de la línea. También la frecuencia de arranque del motor debe tomarse en cuenta.
- b) Paro.** La forma en que debe detener el giro una vez fuera de funcionamiento. Existen varios métodos tales como el frenado libre, el dinámico y a través de zapatas.
- c) Inversión de la rotación.** Se necesitan controladores para cambiar automáticamente la dirección de la rotación de las máquinas mediante el mando de un operador en una

estación de control. Esta acción es muy común en los procesos industriales.

d) Marcha. Las velocidades y características de operación deseadas son función y propósito directos de los controladores. Estos protegen a los motores, operadores, máquinas y materiales, mientras funcionan.

e) Control de velocidad. Algunos controladores pueden mantener velocidades muy precisas para ciertos propósitos industriales, pero en cambio se necesitan de otro tipo para cambiar las velocidades de los motores por pasos o gradualmente (en el caso de los motores de inducción por ejemplo).

f) Seguridad del operador. Como el objetivo del control es proteger, también se contempla la protección de quienes operan una máquina. Los dispositivos piloto de control influyen directamente en los controladores al proteger a los operadores de la máquina contra condiciones inseguras.

g) Protección contra daños. Una parte de la función de una máquina automática es la de protegerse a sí misma.

h) Mantenimiento de los dispositivos de arranque.

2.2.2 ELEMENTOS DE CONTROL ELECTRÓNICO BÁSICOS.

Debido a los grandes avances de la industria en el campo del silicón, se han desarrollado dispositivos que con sólo utilizar una pequeña señal de entrada, logran controlar grandes flujos y potencias eléctricas. A éstos se les ha dado en llamar semiconductores de potencia, y el tipo a emplearse dependerá de los requerimientos de potencia, voltaje y corriente así como del tipo de motor, condiciones ambientales, etc.. A todos ellos junto con los circuitos asociados se les localiza en el bloque denominado controlador.

RECTIFICADOR CONTROLADO DE SILICIO (SCR).

Este elemento contiene tres terminales: ánodo, cátodo y compuerta. El SCR es puesto en posición "on" o en "off" por medio de un pulso de corriente a través de su compuerta. Para entender un poco su funcionamiento, puede decirse que se comporta como un transistor NPN acoplado a un PNP, tal como lo indica la figura 2.3. El grupo se comporta como circuito abierto entre A y K hasta que una corriente i es insertada a la terminal compuerta G pasando de esta forma a comportarse como en corto circuito entre A y K, siendo la única limitante de la corriente de ánodo la resistencia de la carga.

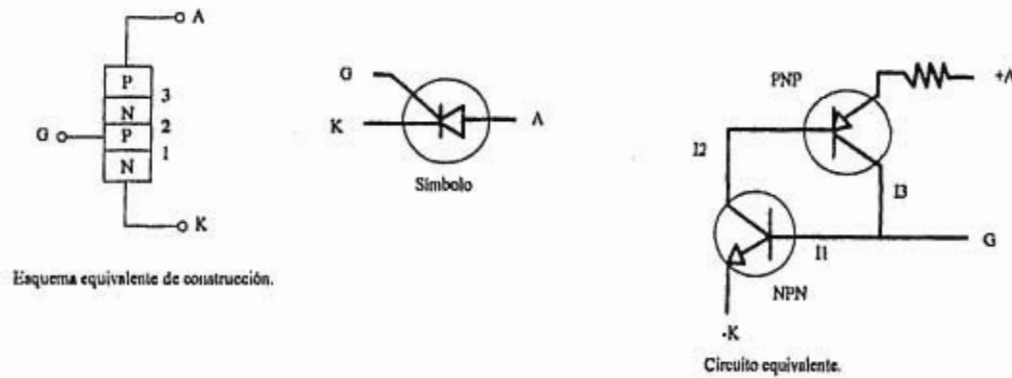


FIG. 2.3 Rectificador controlado de silicio. Construcción, comparación de funcionamiento y símbolo.

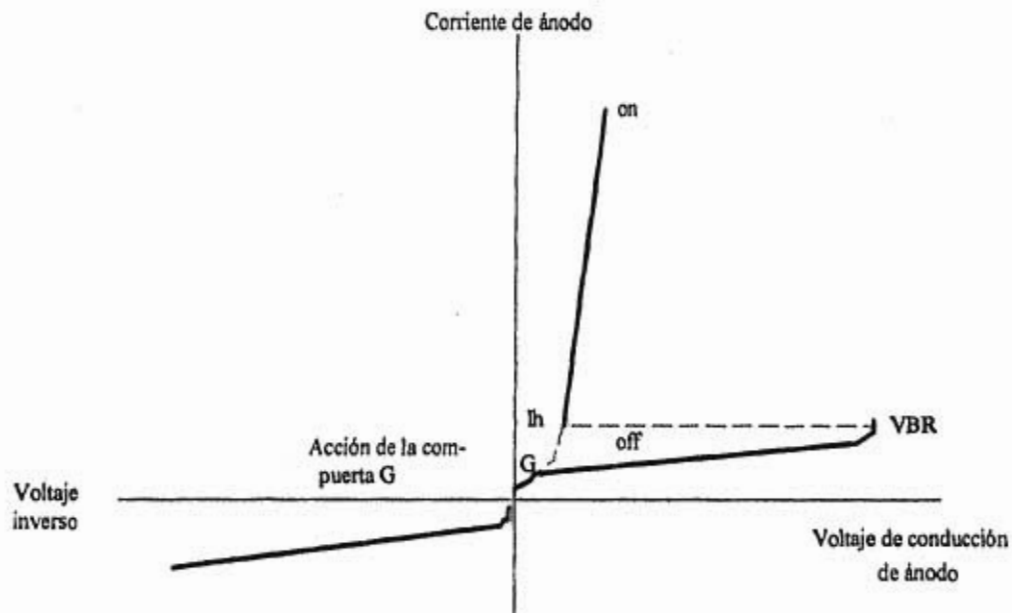


FIG. 2.4 Curva característica del SCR. VBR representa el voltaje de rompimiento. I_h indica la corriente mínima en la compuerta para iniciar la zona on.

Para que se entienda el porqué de la analogía, se verá que al iniciar la corriente en la terminal G se inicia automáticamente un flujo de corriente en el colector del transistor NPN. Esta corriente i_2 es también la corriente de base del PNP; en consecuencia se inicia una corriente de colector del PNP i_3 que alimenta a su vez la base de NPN, e iniciando la posición de avalancha (o feedback) del

conjunto. Si i_l es removida, la corriente de A a K continuará (entonces se ve que el SCR estará funcionando como un simple diodo hasta que el voltaje de ánodo disminuya a cierto valor o la corriente descienda a un valor dado).

Se ha dicho que para iniciar el periodo de conducción bastaba un pulso de corriente entrando por la terminal compuerta. En cambio, para conmutar el SCR a la posición "off", es necesario aplicar un pulso negativo a dicha terminal. En la figura 2.4 se aprecia en forma gráfica las condiciones de operación del SCR.

CONMUTADOR DE C.A. (TRIAC).

Equivalente a aproximadamente un par de SCR en antiparalelo puede bloquear voltajes de ambas polaridades pero a la vez puede iniciar un flujo de electrones en ambas direcciones por medio de un pulso de electrones hacia dentro o fuera de su compuerta. Está compuesto también de 4 capas de material NPNP, pero varias regiones N se localizan dentro de las capas P extremas; una de esas regiones N hace las veces de terminal T y la otra de compuerta G. Mientras tanto la placa superior P está hecha de modo que sobresale de la capa N para formar la terminal T2. En la figura 2.5 se muestra un esquema de la construcción, así como del símbolo del elemento y la curva del comportamiento. Como se indica en la figura 2.6, ambas terminales pueden ser ánodo.

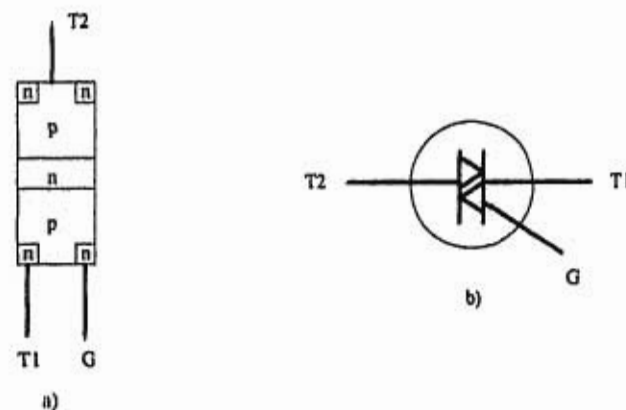


FIG. 2.5 El TRIAC. a) Esquema equivalente de construcción, b) Símbolo.

Cuando T2 es positiva, la curva del triac se parece a la del SCR; un pulso de corriente hacia la terminal compuerta G (o una salida de electrones) inicia el flujo principal de T1 a T2. Cuando T2 es negativa, de la gráfica se observa que la corriente principal fluye hasta que se presenta un pulso de corriente hacia fuera de la compuerta (o entrada de electrones). Sin corriente de compuerta el triac soporta el voltaje aplicado de ambas polaridades (se busca que el valor pico de dicho voltaje sea menor al voltaje de rompimiento VBR). La caída de voltaje en el triac llega en algunos casos a ser de pocos volts.

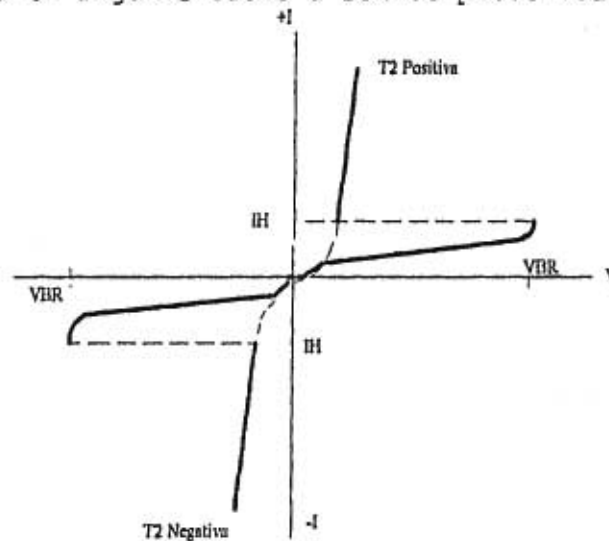


FIG. 2.6 Gráfica característica del triac (V, I). Vbr e I_H indican los mismos parámetros que en la FIG. 2.5.

Mientras que la mayoría de los SCR pueden conmutar a la posición "off" (posición de no conducción) por el sólo cambio de polaridad en el voltaje (aún con señales arriba de 30 Khz), en el triac un cambio rápido de voltaje no lo coloca en la posición "off" por la sencilla razón que puede conducir en ambas direcciones. Pero cuando el triac es utilizado en circuitos de 60 Hz o menos, la razón de cambio de voltaje cerca del punto cero en la onda senosoidal es lo suficientemente baja para permitir la conmutación a "off", siempre y cuando no exista señal en la compuerta.

En la actualidad aún no se dispone de triacs con niveles de corriente y voltaje tan altos como los de los SCR actuales y por tanto se utilizan en el control de motores de capacidades de potencias relativamente bajas. Y cuando se requiere controlar altas potencias lo más común

es utilizar dos SCR en antiparalelo, con la ventaja que se les puede aplicar un voltaje inverso inmediatamente después de cesar la corriente de avalancha en un SCR (en cualquier instante dado uno está operando y el otro no).

Aunque los anteriores elementos son los más empleados en el control electrónico, existen otros elementos desarrollados para tales fines pero que no han logrado cubrir todos los requisitos para poder desplazarlos. Por ejemplo se tiene el caso de un tipo de SCR conocido como GCS ("gate controlled switch" o conmutador controlado por compuerta) y GTO ("gate turn off" o apagado por compuerta), los cuales operan mediante una señal adecuada de compuerta; sin embargo aún no existen con los niveles de corriente y voltaje altos como los SCR.

También en ocasiones se utilizan transistores de potencia en circuitos de control de motores como elementos de conmutación. Sus ventajas entre otras son una menor caída de voltaje ánodo-cátodo en el encendido (comparado con un SCR) y que se traduce en menores pérdidas de potencia; los tiempos de conmutación son menores que los de los SCR y los problemas relacionados con apagado o conmutación en SCR casi no existen con los transistores. Pero sus desventajas también son importantes, pues un transistor de potencia es más costoso que un SCR de capacidad equivalente; los niveles de voltaje y corriente disponibles en transistores de potencia son mucho más bajos que los de los SCR existentes.

Existe otro acomodo conocido como Darlington de potencia y equivale al acoplamiento de dos transistores. Han encontrado bastante aceptación por su capacidad de reducir el tamaño, costo y peso de los controladores de motor. Son utilizables en supresores para control de motores de conmutador en C.C. y en inversores para control de motores de C.A., por lo general en aplicaciones de baja potencia.

COMPUERTAS LÓGICAS.

Un sistema lógico es el que siempre funciona de una manera predeterminada, de modo que para una serie de condiciones produce siempre la misma respuesta. La misión de una puerta lógica es controlar el flujo de información o datos a través del sistema; el nombre de puerta lógica se debe a que un dispositivo lógico está o abierto al flujo de datos a través o está cerrado y nunca en un punto medio.

Los tipos básicos de puertas se denominan "and", "or" y sus inversos y el funcionamiento de cada puerta lógica debe ajustarse a reglas estrictamente definidas. La explicación de su funcionamiento es algo complejo y queda fuera de la idea de este trabajo, pero puede decirse que proporciona una solución definida a todas las posibles condiciones del circuito. Esto es, la salida puede expresarse siempre en la forma de un "si" o de un "no" (puede entenderse como un sistema binario). A continuación se dan las tablas a las que responden:



AND

A	B	Salida
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



OR

A	B	Salida
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1



NAND

A	B	Salida
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



NOR

A	B	Salida
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Es bueno aclarar que existen más tipos de puertas lógicas tales como las "or exclusivo", "separador" (o buffer), "inversor", etc. los cuales no se explican.

2.2.3 ELEMENTOS BÁSICOS DE CONTROL ELECTROMECAÁNICO.

El principio básico es la alineación de flujos magnéticos y la búsqueda de la menor reluctancia en un circuito magnético, lo que se aprovecha para propiciar el cierre y apertura de contactos montados en la parte móvil del núcleo del electroimán que lo compone.

Dentro de los equipos electromecánicos figuran los arrancadores y contactores magnéticos, relevadores de tiempo, de sobrecarga y las combinaciones que se puedan conseguir de ellos. Además existen otros equipos accesorios como los interruptores de límite, de flotador, de presión, termostatos, controladores de tambor, etc. que ayudan al control y hacen las veces de los ojos del controlador. En otras palabras, provocan las señales de retroalimentación necesarias para el estricto control. Es bueno señalar que algunos de estos accesorios son adaptables al control electrónico.

En el caso del control manual, es común utilizar dispositivos como los siguientes, tomando en cuenta que este tipo de control es empleado únicamente en máquinas pequeñas:

INTERRUPTOR DE VOLQUETE.

Aquí el motor arranca directamente sin el uso de interruptores magnéticos o equipo auxiliar. Estos motores son protegidos mediante fusibles o cortacircuitos en el circuito derivado y se trata de pequeños motores de no más de 3/4 de Hp.

CONTROLADOR DE TAMBOR.

Son dispositivos interruptores del tipo rotatorio usados a menudo para invertir la rotación de los motores y controlar la velocidad de las máquinas de C.A. y C.C.. En los motores de mediano tamaño suelen usarse en combinación con arrancadores magnéticos.

INTERRUPTOR DE FLOTADOR.

La elevación o descenso de un flotador unido mecánicamente a contactos eléctricos, puede arrancar bombas impulsadas por un motor, o para accionar el arrancador que alimenta a dicho motor. Esto es en cierta forma un control automático.

INTERRUPTOR DE PRESIÓN.

Utiliza la existencia de un diferencial de presiones en un diafragma para que éste a su vez accione mecánicamente a contactos eléctricos y emitir señales de paro o arranque a un motor o a su controlador.

TERMOSTATO.

Este dispositivo utiliza los cambios sensibles de temperatura en el elemento transductor para emitir una señal informe al controlador de aquéllo que es accionado y susceptible a calentarse o enfriarse.

INTERRUPTOR DE LÍMITE.

Utilizado sobre todo para gobernar el arranque, el paro o la inversión de rotación de los motores eléctricos.

ARRANCADORES MAGNÉTICOS PARA VOLTAJE DE LÍNEA.

Útiles en motores cuando no hay objeción por la oleada de corriente resultante del arranque y el par obtenido no afecta la maquinaria impulsada. Son económicos y seguros y se controlan por medio de dispositivos piloto tales como estaciones de botones, interruptores de flotador, o relevadores de control de tiempo. En la figura 2.7 se puede ver la estructura del electroimán junto con el conjunto de contactos. A la vez se muestra una simplificación del artefacto con las partes esenciales que lo componen y por último su representación esquemática.

ARRANCADORES A VOLTAJE REDUCIDO.

En ocasiones resulta necesario conectar a la línea un motor cuyas corrientes de arranque resultan indeseables por los trastornos que provocan. Para estos casos se han desarrollado equipos arrancadores magnéticos sincronizados de manera que al conectar el motor a la línea lo hacen a través de un medio reductor de voltaje. A saber se tienen los siguientes:

- a) Del tipo de resistencia primaria. La reducción de voltaje se consigue mediante la conexión de una resistencia en serie con la línea y el motor (que por lo regular es del tipo de inducción).
- b) Del tipo de autotransformador. Se utilizan dos autotransformadores conectados en delta abierta. Durante el arranque el motor se conecta a unas derivaciones del autotransformador. El cambio a alimentación a pleno voltaje se lleva a cabo mediante relevadores de tiempo.
- c) Para motores de embobinado parcial. Utilizado cuando el motor es conectable a dos voltajes diferentes.
- d) Automáticos para motores estrella-delta.

RELEVADORES DE CONTROL.

Son dispositivos auxiliares en los circuitos de control para interrupción del circuito de bobina de los arrancadores grandes y también pueden controlar motores pequeños u otras cargas. No proporcionan protección contra sobrecarga a los motores y, ordinariamente, se usan en sistemas de control de dos alambres. Por lo regular están provistos de contactos normalmente abiertos y normalmente cerrados. Los contactos de la carga del relevador, se usan con más frecuencia para abrir y cerrar circuitos de control que para accionar circuitos de potencia.

CONTACTORES.

Son interruptores accionados mediante electromagnetismo. Su diferencia principal con un arrancador para motor es que no contiene relevadores de sobrecarga. Se emplean para interrumpir, con dispositivos piloto de control, cargas tales como alumbrado, calefacción y para controlar motores de C.A. cuando la protección contra sobrecarga se instala separadamente.

RELEVADORES DE CONTROL DE TIEMPO (RCT).

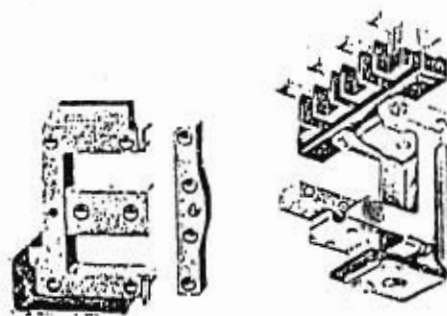
Su principio es abrir o cerrar los contactos un determinado tiempo (que es regulable) después de energizado o desenergizado. A continuación se nombran algunos tipos:

- a) RCT con fluido amortiguador. El efecto retardante es provocado por un pistón que se mueve dentro de un cilindro lleno de aceite.
- b) RCT neumáticos. Utilizan una unidad neumática cuya función de retardo depende del paso de aire a través de un orificio restringido mediante el uso de un fuelle o diafragma de caucho sintético reforzado. En la figura 2.9 se muestra el ejemplo del tipo cerrado a retardo.
- c) RCT impulsado por motor. Empleado cuando se requiere un proceso definido de cerrado o abierto, o una secuencia de operaciones sucesivas. En general, se usan cuando se necesita arranque poco frecuente de motores grandes. Consiste de un pequeño motor sincrónico que impulsa un conjunto de leva y disco montado a una flecha que cierra y abre alternativa o sucesivamente unas unidades interruptoras. A su vez estos contactos se conectan en circuitos para energizar relevadores o contactores de control para las operaciones deseadas.
- d) RCT del tipo de capacitor. Consiste en conectar la bobina del electroimán en paralelo con un capacitor y a la línea de C.C.. Al interrumpir la alimentación el capacitor se descargará a través de la bobina, obteniendo el retardo deseado según lo ajustado. En la figura 2.10 se muestra la curva de descarga del capacitor.

Al tenerse una aplicación específica del RCT, se deben considerar los siguientes factores en la selección:

- Duración del retraso de tiempo requerido
- Variación del control de tiempo deseado
- Error permisible
- Ciclo de operación y tiempo de restablecimiento
- Costo
- Naturaleza de la alimentación de energía
- Características nominales del contacto

- Formas de funcionamiento de los contactos
- Variación de temperatura
- Tamaño y espacio disponible.



Square D Co.

Figura C-1. Estructura del imán (izquierda) y conjunto de contactos móviles y guía de la armadura de un interruptor magnético de cuatro polos

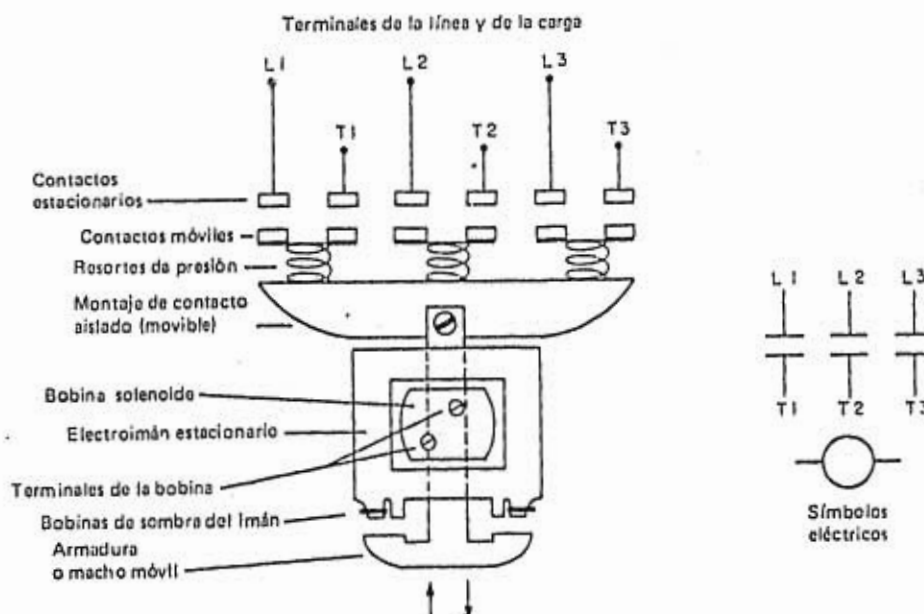
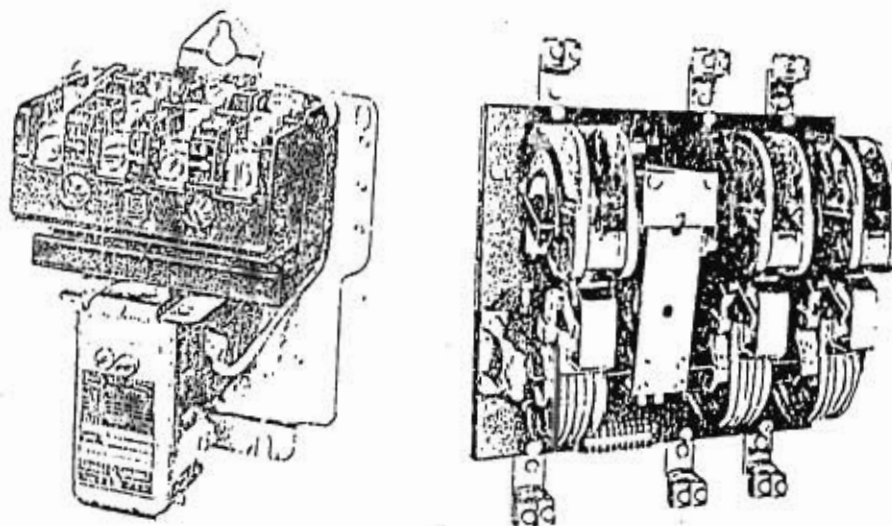


FIG. 2.7 Interruptor electromagnético (Tomado de control de motores eléctricos, Walter N. Alerich, pag. 25)



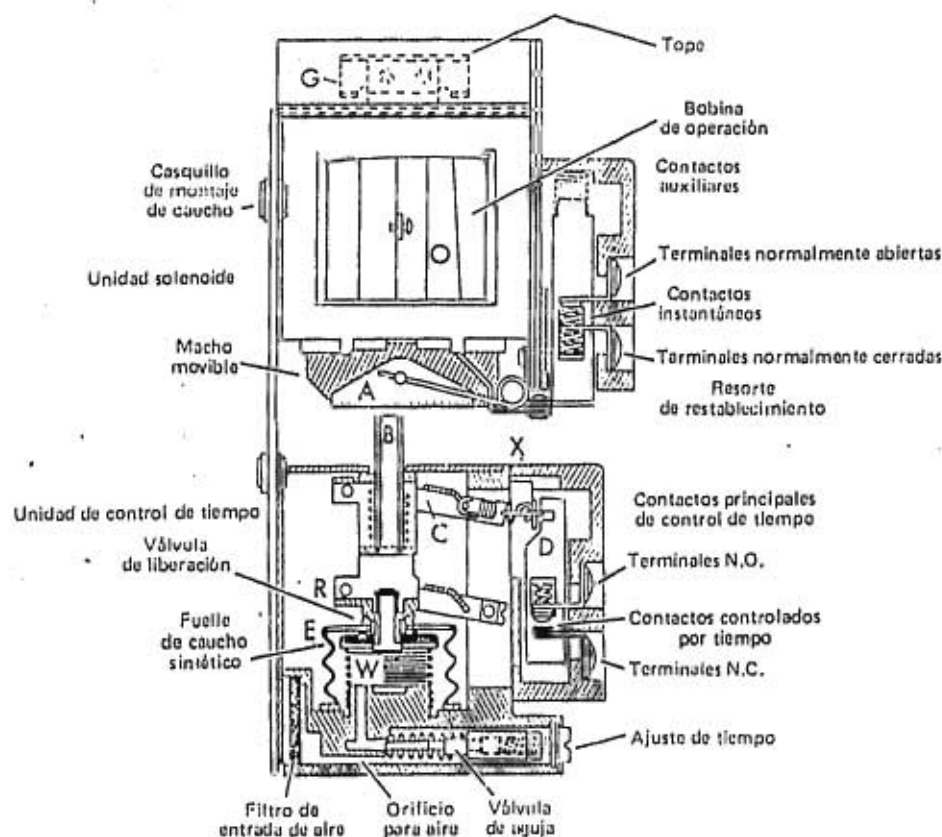
Square D Co.

FIG. 2.8 Contacto magnético abierto, del tipo vertical, tamaño 1 (izquierdo), y contactor magnético del tipo de acción basculante, tamaño 6 (derecha).

Hablando en términos generales puede decirse que aunque existe una gran variedad de dispositivos tanto electrónicos como electromecánicos, cuando se presenta un problema concreto de diseño de controlador, en la mayoría de las ocasiones ocurre un proceso de eliminación que tarde o temprano termina en la selección de entre pocos. Y para darse cuenta de ello, con sólo hojear un catálogo de cualquier proveedor es más que suficiente, pero al analizarlo con detenimiento se ve que inclusive se indican los usos más recomendados para cada modelo de dispositivo. Aún así se mencionan algunos factores que se consideran predominantes e introductorios en cierta forma para la elección del tipo:

- 1.- Niveles de potencia a controlar, así como su naturaleza, tales como C.A. o C.C., y voltaje.
- 2.- Tipo de alimentación disponible para los controladores.

- 3.- Factor de uso de los mismos.
- 4.- Grado de automatización que requiera el proceso o mecanismo impulsado por las máquinas controladas. Definir las necesidades de secuenciación.



Allen-Bradley Co.

FIG. 2.9 Sección transversal de un control de tiempo para C.A., del tipo cerrado retardo, que proporciona retardo de tiempo después de energizar la bobina. Se muestra con la bobina energizada y el control de tiempo desconectado.

- 5.- Capacidad técnica para el mantenimiento del equipo.
- 6.- Facilidades para adquirir el equipo deseado o las refacciones requeridas para el mantenimiento.
- 7.- Presupuesto disponible y costos de dispositivos y mantenimiento entre otros.

En el capítulo siguiente se hablará un poco sobre algunos circuitos básicos más comunes en el control y se verá entonces el porqué del uso de ciertos dispositivos.

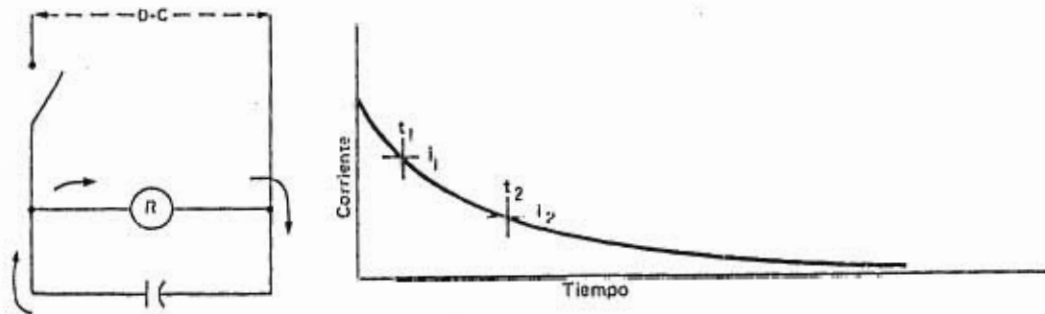


FIG. 2.10 Circuito y curva de funcionamiento de un relevador de control de tiempo del tipo de capacitor.

CAPÍTULO 3
CIRCUITOS DE CONTROL

En este capítulo se hará referencia al control automático y semiautomático en general, mencionando sólo como antecedentes algunos conceptos en lo relativo al control manual. En el caso de los motores de C.C. se verá que una característica a controlar es la facilidad de regular su velocidad. En los motores de C.A. esta característica no resulta tan fácil, en cambio hay que tener presente que el momento del arranque resulta muy importante. Antes de describir los sistemas automáticos, se verá cómo una persona realiza el control de modo manual como una forma de comparar el funcionamiento de los sistemas automáticos. Para ello se pondrá como ejemplo la regulación de velocidad de un motor de C.C.

Primero la persona gira la perilla reguladora a modo de aumentar o disminuir la velocidad de la máquina hasta la que trae en mente. Obtenido esto, se detendrá la acción de ajuste. Para darse cuenta si ya se tienen esas condiciones, leerá el tacómetro. En este caso el detector de error será su cerebro y cuando encuentre algún error entre lo obtenido y lo deseado, moverá la perilla hasta encontrar la posición adecuada que ofrezca la respuesta adecuada.

Para reemplazar a esta persona por un control automático serán necesarias las siguientes acciones:

- 1.- El regulador deberá comunicar qué velocidad es la deseada, alimentando una señal o voltaje de referencia y el cual represente dicha velocidad.
- 2.- El regulador deberá tener una señal o voltaje similar que represente la velocidad real de la máquina (retroalimentación), la cual tenga el mismo valor que la anterior sólo cuando se tenga la velocidad deseada.
- 3.- Que el detector pueda encontrar cualquier mínima diferencia entre ambos voltajes y señales, a la vez que sea capaz de transformar dicho error en un voltaje que pueda ajustar la potencia utilizada hasta obtener la velocidad deseada.

Con el ejemplo anterior se trata de ilustrar que para poder desarrollar controladores capaces de hacer lo que se desea que hagan, existe la necesidad de conocer perfectamente el funcionamiento de aquéllo que se va a controlar (la máquina) y ver qué tan factible es el encontrar y adquirir aquellos dispositivos que puedan ejecutar las acciones que haría una persona como controlador. Cabe recordar que el factor costo juega en muchas ocasiones un papel muy importante, pues existirán situaciones en que un punto sofisticado de automatización

lleve consigo complicados y costosos circuitos o dispositivos de control y cuyo costo sea irredituable.

Dicho lo anterior se pasará a ver algunos circuitos comunes en control de motores eléctricos. Algunos de ellos suelen ser muy utilizados en las escuelas de técnicos para dar una introducción al diseño de circuitos de control. Es bueno aclarar que estos circuitos son tan solo un ejemplo de varios que pueden conseguir el mismo fin.

3.1. REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LOS MOTORES DE C.C..

La característica más importante de estas máquinas es el amplio rango en el que varía la velocidad de funcionamiento. Para ello existen tres métodos muy utilizados: modificando el flujo normalmente por medio de un reóstato de campo en el circuito del devanado derivación; ajustando las resistencias del circuito de armadura; y variando la tensión en los bornes de la armadura.

El empleo del reóstato es el más empleado, ya que también se puede aplicar a los motores de excitación compuesta. El ajuste de la corriente de excitación, y con ello del flujo y de la velocidad, es relativamente sencillo y casi sin aumento de las pérdidas en el motor. La velocidad máxima obtenible es la que corresponde al campo máximo (resistencia de reóstato nula) y la mínima está limitada por los efectos de la reacción del inducido. Si además se adiciona un devanado estabilizador y uno de compensación, el rango de velocidades se aumenta considerablemente. Algo importante de este método es que se consigue una regulación con entrega de potencia constante debido a que:

- 1.- La corriente máxima I_a de armadura es la nominal, y
- 2.- La fuerza contraelectromotriz E_a se mantiene constante pues el efecto de cambio de velocidad se compensa con el cambio de flujo que lo motiva.

El producto $I_a \cdot E_a$ prácticamente no varía. Por otra parte el par varía directamente con el flujo, alcanzando su valor máximo a la menor velocidad.

La regulación por variación de resistencia en el circuito de armadura consiste en insertar resistencias en serie y puede emplearse tanto en motores serie como en los de derivación o en los de excitación compuesta. Al hacerse dichas variaciones de resistencia, se varía la caída de tensión en ella y por consiguiente la intensidad que circula por el circuito, variándose finalmente la

velocidad. Una desventaja que presenta este método es que no se tiene una regulación muy precisa de velocidad que se ve al variar la carga. Otra característica es que proporciona un par de salida constante ya que tanto el flujo como la intensidad en la armadura se mantienen aproximadamente constantes aun con la variación de velocidad; es decir, la potencia de salida del eje decrece proporcionalmente con la velocidad lo que es una desventaja.

3.2. REGULACIÓN DE VELOCIDAD Y ARRANQUE DE LOS MOTORES DE C.A.

Una de las desventajas de estos motores estriba en que su velocidad no puede variar fácilmente. Básicamente la variación se consigue:

- 1.- Modificando la velocidad síncrona del campo progresivo.
- 2.- Cambiando el deslizamiento.

A su vez, la modificación de la velocidad síncrona se lleva a cabo:

- a) Modificando el número de polos, obtenible de un simple cambio en las conexiones de la bobina del estator, haciendo que el número de polos varíe en la relación de 2 a 1, con lo que pueden seleccionarse dos velocidades síncronas distintas. El rotor siempre será del tipo de jaula de ardilla, ya que siempre reacciona creando un campo del mismo número de polos que el campo inductor del estator.
- b) Variando la frecuencia de entrada, variando como contrapeso la tensión en bornes en forma proporcional de modo de conservar constante la densidad de flujo y por ende el par máximo. Esto tiene una desventaja económica pues para conseguir esto es necesario emplear un transformador de frecuencia como por ejemplo una máquina de inducción con rotor bobinado que a su vez mueva un generador de corriente alterna, otro sería el empleo de convertidores estáticos de frecuencia, método más común.

En lo que respecta a la variación de cambio de deslizamiento sería bueno recordar que la eficiencia es aproximadamente proporcional a $(1-s)$ por lo que cualquier método que depende de dicha variación es ineficiente. Sin embargo, se mencionan los existentes:

- a) Método del voltaje de estator variable.
- b) Método de la resistencia variable del rotor, aplicable sólo al motor de rotor devanado.
- c) Control mediante conmutación de estado sólido.
- d) Control de velocidad mediante máquinas auxiliares.

En cuanto al arranque, es necesario acelerar el motor desde el reposo hasta la velocidad de operación, requiriéndose una entrada de energía mayor que la energía cinética del motor y carga juntos, debiéndose cuidar que la corriente de arranque no sea excesiva para que se pueda cumplir lo anterior.

Para la limitación de la corriente, se tienen algunos métodos comunes, tales como:

1.- Arranque a voltaje reducido. Consiste en aplicar un voltaje reducido al estator, que se va aumentando hasta el voltaje nominal cuando el motor alcanza un cuarto de su velocidad nominal. Su limitante es que requiere de una fuente de voltaje regulable y además se tiene un bajo par de arranque.

2.- Arranque estrella-delta. Aunque es un caso de arranque a voltaje reducido, no requiere controles de voltaje externos. Aquí se aprovecha la conexión estrella que reduce el voltaje de fase, generándose una menor corriente en el arranque (de aproximadamente $2/5$) de la que se obtendría con el arranque delta. Por otro lado, la desventaja es que también se tendría un bajo par de arranque (aproximadamente $1/3$), de su valor en conexión delta. La ventaja que tiene este método es su bajo costo, pues sólo es necesario un conmutador de 3 polos-2 tiros.

3.- Arranque con limitación de corriente por resistencia en serie. Se emplean resistencias en serie, intercaladas en las tres líneas durante el arranque y disminuyéndolas a medida que el motor adquiere velocidad. Su desventaja es el requerimiento de grandes resistencias que soporten elevadas corrientes, y que traen consigo desperdicio de energía.

Como ya se sabe, el par de arranque depende de la resistencia del rotor. Así, una alta resistencia significa un alto par de arranque. Llevando esto a la práctica, en un motor de rotor devanado se puede utilizar una resistencia externa alta durante el arranque. En los motores de jaula de ardilla grandes, el rotor está provisto por lo regular de un doble enrejado, es decir, una jaula interior alojada profundamente y con baja resistencia y una jaula exterior. En el arranque, a causa del efecto piel, domina la influencia de la jaula exterior con un par elevado de arranque. A medida que se acelera, la corriente penetra a los dominios de la jaula interior dando lugar a una operación eficiente en régimen estacionario. Ambas jaulas llevan corriente, aumentando la capacidad del motor.

- Arranque controlado por componentes de estado sólido. Este tipo de controles ha sido muy desarrollado en los últimos años. Principalmente buscan controlar el voltaje en

el arranque recortando la amplitud de la onda o reduciendo la corriente de arranque a través de circuitos limitadores. Una ventaja de ellos es que es posible modificar la frecuencia de la señal de alimentación (normalmente de 60 Hz.) y con ello se obtiene la variación de la velocidad de salida del motor.

3.3 CIRCUITOS DE CONTROL DE MOTORES DE C.C.

Puede decirse que el problema fundamental que se le presenta al control de motores de C.C. es el de mantener la velocidad de funcionamiento en un valor constante. Para ello se han diseñado varias formas de conexión las cuales ya han sido mencionadas. Además si en ellas se intercalan resistencias variables se podrá lograr el control y la variedad de velocidades deseadas.

Un ejemplo simple y típico es el que se muestra en la figura 3.1. Como se ve el motor puede estar compuesto por uno o más devanados en su estator. Para aumentar la velocidad del motor, el voltaje aplicado a la armadura deberá ser incrementado o bien el aplicado al devanado derivación (shunt) deberá ser disminuido. Aunque tanto los reóstatos FR y T pueden servir como controladores de velocidad, es preferible hacerlo por medio del primero ya que la corriente que fluye a través de este devanado se ve menos afectada con los cambios de carga aplicados. Otra forma de salvar los efectos provocados por los cambios de carga es mediante un sistema independiente de alimentación de armadura el cual pueda ser cuidadosamente controlado.

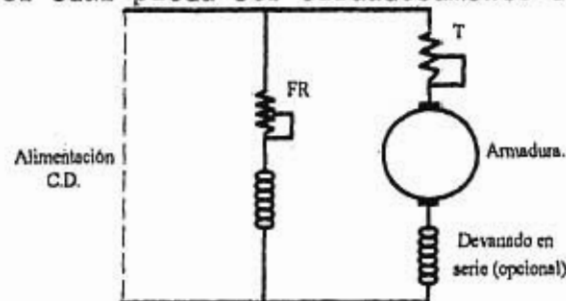


FIG. 3.1 Diagrama de conexiones típico de un motor de C.D.

Un sistema como el mencionado antes puede ser el que utiliza un generador de C.C. como alimentador de armadura. Como se ve en la figura 3.2 aunque este generador G es operado a velocidad constante, su voltaje de salida es controlado a través de la alimentación del devanado de campo. Disminuyendo la resistencia de GR se incrementa la corriente de campo, incrementando el voltaje de salida del.

generador (que a su vez es aplicado a la armadura del motor, aumentando con ello su velocidad). Al mismo tiempo el motor recibe su corriente de campo de un pequeño generador independiente E; si el reóstato M_r del campo del motor aumenta su resistencia, disminuye la corriente de campo del motor, incrementando la velocidad del mismo. De esta forma se podrá obtener una alimentación variable, en donde la velocidad se podrá controlar modificando tanto el voltaje de armadura como el voltaje de campo del motor.

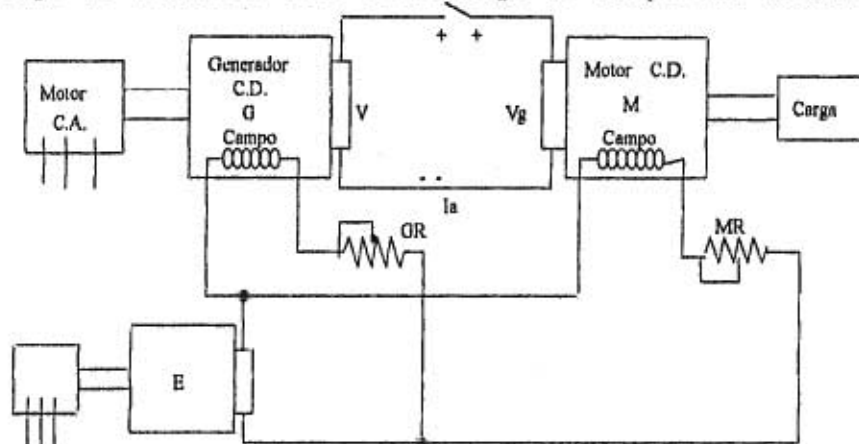


FIG. 3.2 Sistema WARD-LEONARD de alimentación independiente para un motor de C.D.

Uno de los grandes inconvenientes de este sistema es la necesidad de utilizar 4 máquinas para poder operar una quinta (que es la que se intenta mover). Sin embargo con los adelantos electrónicos actuales, se pueden sustituir dichas partes por dispositivos estáticos de conversión, teniendo la misma facilidad para variar sus parámetros de salida. Entonces se puede simplificar el diagrama de bloques anterior por el de la figura 3.3.

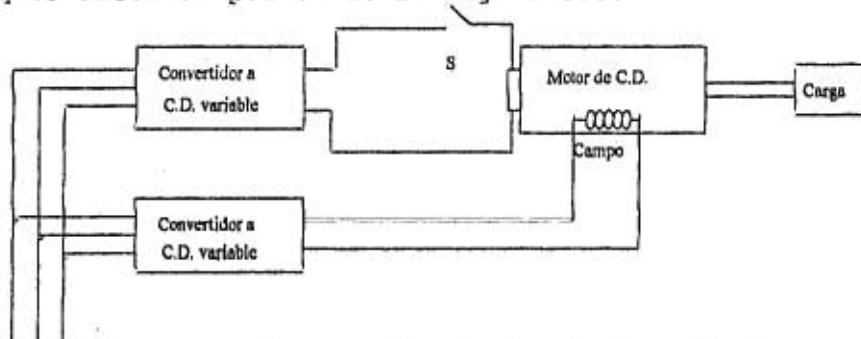


FIG. 3.3 Esquema de un alimentador independiente para un motor de C.D. Al igual que en la fig. 3.2, el campo y la armadura tienen su suministro por separado.

3.3.1 CIRCUITOS RECTIFICADORES.

RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA MONOFÁSICO.

Es el circuito más sencillo formado por un diodo rectificador único, trabajando sobre la línea y la carga (que en el caso de un motor de C.C. se comporta como una carga RL). Si se observan las gráficas de la figura 3.4. se verá que el efecto de la inductancia sobre la señal de entrada provoca un retraso en la intensidad i_n , desfasando el voltaje presente en R (V_R). La diferencia entre ambos voltajes (V_o y V_R) es la presente en L y se le denomina V_L . Cuando V_o pasa a ser menor que V_R , con base en la gráfica se concluye que L se descarga a través de R provocando que su voltaje sea mayor al de V_o . La gráfica de la corriente muestra la intensidad real i_n y sus componentes i_1 (perteneciente al comportamiento en régimen permanente) e i_2 (componente transitoria).

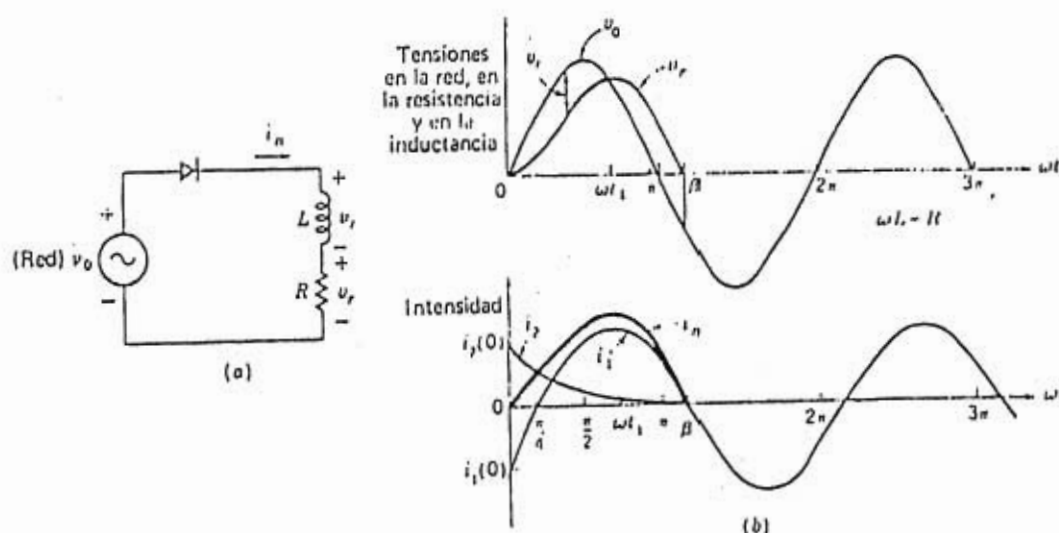


FIG. 3.4 Funcionamiento de un rectificador diodo de media onda con carga reactiva RL. a) circuito, b) Ondas de las componentes de tensión en la carga, V_r y V_l y de la intensidad en la carga i_n .

Este sistema rectificador puede utilizar diodos comerciales de baja capacidad conductiva, o bien rectificadores de silicio controlados (SCR). Se recomienda que este sistema no sea usado para controlar motores de más de 5 Hp. Para conseguir una regulación de velocidad, lo más conveniente y cómodo es intercalar una resistencia variable para limitar y controlar el voltaje presente en los elementos del motor. Además para tener una analogía con el sistema explicado en el punto anterior, se podrán utilizar un par de estos circuitos, donde uno alimentará al circuito de armadura y el otro al de campo.

Existen otros circuitos más sofisticados, en donde se logra un amplio control del voltaje entregado y que pueden contrarrestar los efectos de aumento de carga. El circuito mostrado en la figura 3.5 convierte una alimentación 60 Hz y 115 volts de C.A. en 10 amps de salida de C.D. y 120 volts con gran capacidad de regulación. Esto último es obtenido a través de las terminales 1 y 2 que a su vez carga un capacitor de gran capacidad cuya energía almacenada es usada durante ciertas partes del ciclo.

A la izquierda de la figura, los diodos D1 a D4 forman un puente rectificador de onda completa, de modo que el potencial presente en A alcanza los 160 V. en los picos de cada pulso. Si la energía almacenada del capacitor C6 a la derecha ha sido utilizado parcialmente de modo que el potencial de la línea 1 disminuye a 100 V., el SCR es encendido tan pronto como el potencial en A sea mayor al de la línea 1; entonces una gran corriente fluye a través de él y de esta forma recarga al capacitor C6 durante la parte sombreada del medio ciclo en la figura (gráficas). Una vez que C6 casi ha llegado al total de su carga, la línea 1 se enciende muy tarde de modo que la corriente de recarga fluye durante una pequeña porción del medio ciclo. El retraso en el encendido del SCR se describe a continuación.

La figura del circuito muestra cómo el voltaje presente en C6 también lo está en el conjunto de resistencias R5, P1, R6 y R7; una parte de este voltaje es ajustado por P1 y está presente entre las líneas H y J, la base del transistor NPN de Q. El voltaje entre la línea 1 y J también se aplica a R9 y D; este diodo zener mantiene al emisor E de Q en 8 V. más positivo que J. Cuando el voltaje de C6 es menor del deseado, se tendrán menos de 8 V. entre H y J de modo que la base de Q será más negativa que el emisor E. En estas condiciones el transistor Q no puede conducir ningún flujo; de esta forma no habrá flujo de

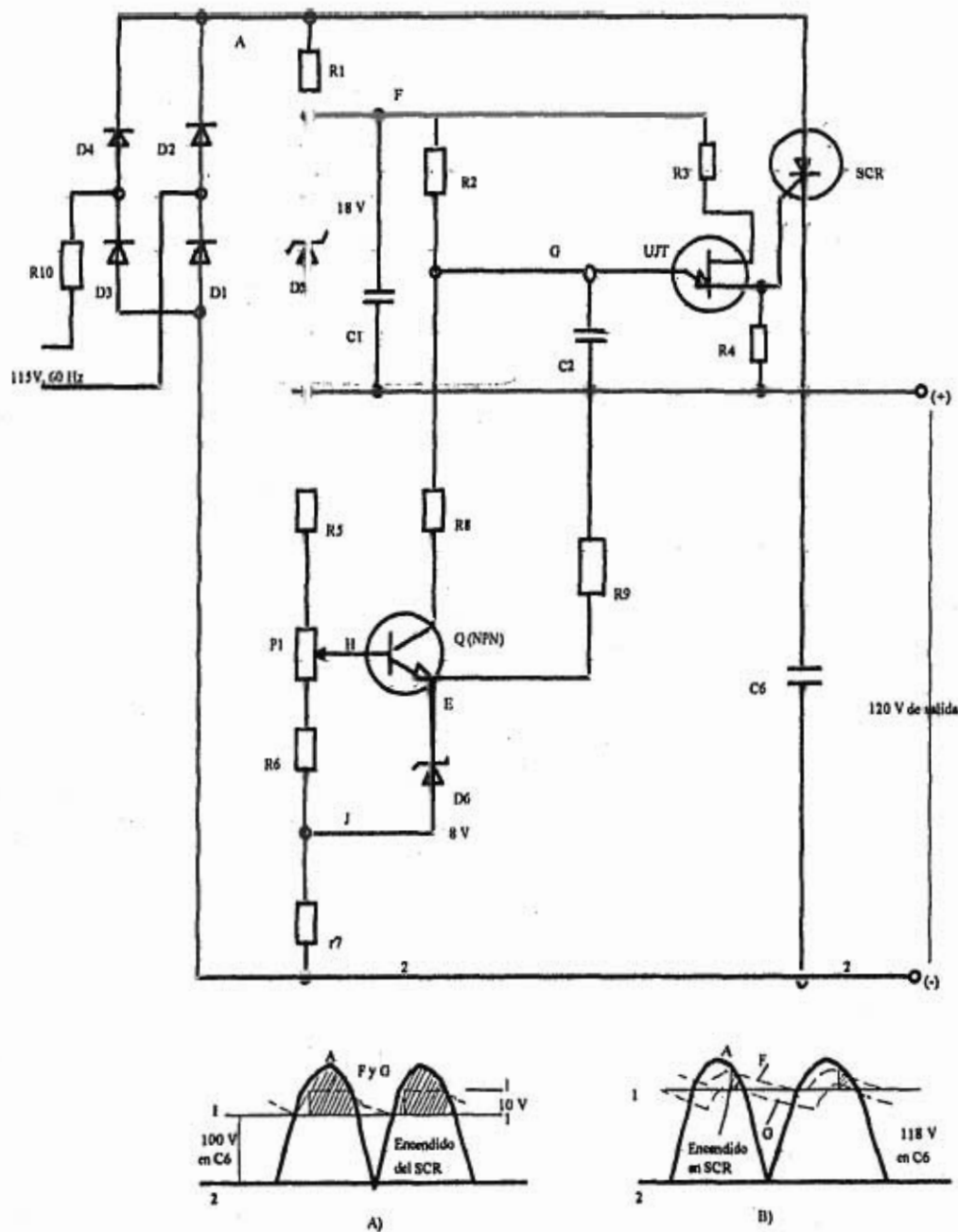


FIG. 3.5 Circuito convertidor de C.A. a C.D.

colector a través de R8 y R2. En este caso, C2 se cargará rápidamente a través de R2, incrementando el potencial de G a cerca de F en un lapso menor del medio ciclo que

transcurre. Al inicio de cada medio ciclo, cuando A aumenta su valor a uno mayor al de la línea 1, circula una corriente a través de R1 y rápidamente carga C1; el diodo zener D5 limita el voltaje de C1 a 18 V. Cerca del final del medio ciclo, como el voltaje en A desciende a un valor menor al de la línea 1, C1 se descarga a través de R3, del UJT y de R4. Entonces el potencial en F desciende al de casi la línea 1 antes de iniciarse el medio ciclo, como se ve en la gráfica. La corriente circula a través del emisor del UJT y R4, de modo que la computadora del SCR recibe un pulso positivo que enciende el SCR a casi recién iniciado el medio ciclo.

Cuando el voltaje de salida en C6 es cercano al deseado (120 V.), el potencial en la línea 1 incrementa el voltaje entre H y J a más de 8 V.; como H es más positivo que E, la corriente de colector fluye en el transistor Q a través de R8 y R2. Esta corriente a través de R2 hace descender el potencial en G muy abajo del F; entonces la terminal superior de C2 se vuelve negativa (respecto a la otra) durante el intervalo entre los medios ciclos. Cuando F aumenta nuevamente, la carga en C2 hace que G aumente más lentamente; entonces la mayor parte del medio ciclo transcurre antes de que G aumente su potencial lo suficiente para permitir que el UJT encienda al SCR. Cuando C6 está totalmente cargado al nivel seleccionado por P1 una gran corriente de colector provoca una gran caída de potencial a través de R2 de modo que G nunca aumentará el suyo lo suficiente como para encender al UJT y al SCR.

Este circuito como ejemplo, puede ser empleado en la alimentación de pequeños motores, sobre todo en el circuito de armadura donde se precisa un buen control del voltaje aplicado con la ventaja de poder variar dicho voltaje, aunque a menor escala. Para el caso de querer alimentar máquinas mayores, se podrían hacer ciertas modificaciones, como tener alimentación trifásica y un SCR y capacitor C6 de mayor capacidad por ejemplo.

3.4 CIRCUITOS DE CONTROL DE MOTORES DE C.A.

En la actualidad el uso de los motores de C.A. se ha hecho una práctica común en la industria, pues en la mayoría de sus procesos no es requerible un control esticto en la velocidad de accionamiento de los mecanismos impulsados. El control de estos motores debe incluir la protección. Las normas técnicas para instalaciones eléctricas (NTIE) de la Dirección General de Normas de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI)

recomienda que se observe el diagrama mostrado en la figura 3.6. A su vez algunas casas de equipo de control han editado catálogos que contienen información sobre métodos de arranque y las correspondientes características afectadas. En el apéndice de este trabajo se podrán ver algunas tablas tomadas de dos de ellas.

De la misma información contenida en dichas tablas, se analizarán los circuitos de control de la siguiente forma:

- Control de motores de inducción trifásicos,
- Control de motores trifásicos de rotor devanado,
- Control de motores trifásicos síncronos.

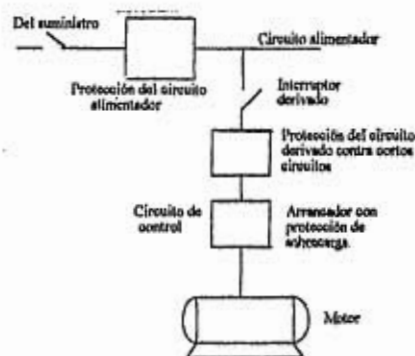


FIG. 3.6 Diagrama lineal normatizado de conexión de un motor.

3.4.1 CONTROL DE MOTORES DE INDUCCIÓN DE C.A. TRIFÁSICOS.

Debido a la gran versatilidad de este tipo de máquinas resulta importante el modo de iniciar su funcionamiento, pues dependerá de las condiciones en que suceda para lograr las propiedades deseadas. Hay que recordar que del período de funcionamiento de un motor, la parte crítica es durante el arranque donde tiene que superar su inercia y la de la carga.

Del catálogo de Square D se ha sacado una tabla comparativa donde se muestran las características en % de la tensión, corriente y par del motor, así como sus ventajas y desventajas (tabla No. 3); en la tabla de selección (tabla No. 4) se indica qué método se debe utilizar según la característica deseada.

Básicamente existen 6 métodos a saber para iniciar el funcionamiento de un motor de inducción:

- A plena tensión.
- Por resistencia primaria (tensión reducida).
- Por autotransformador (tensión reducida).
- Estrella-delta.
- Devanado bipartido.
- Arranque por mando síncrono.

A continuación se da una breve descripción de ellos, aunque es bueno aclarar que no son los únicos y además existen combinaciones de dos o más de ellos que se omitirán.

- A PLENA TENSIÓN.

Este método suele ser adecuado en el control manual de motores de 1 o más fases, e inclusive en corriente directa. Sus aplicaciones más frecuentes se localizan en pequeñas máquinas herramientas, bombas, extractores ventiladores y transportadores; como se nota, en todos ellos se utilizan motores con relativa baja potencia. Aunque poseen los mismos problemas que los existentes en motores grandes, no son tan considerables como para necesitar métodos especiales. En la figura 3.7 se muestra el diagrama de conexiones más común de este método, y el diagrama lineal se representa en la figura 3.8 en donde se omite el sistema de potencia.

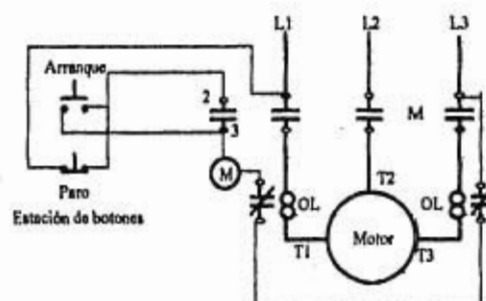


FIG. 3.7 Diagrama de conexión de un motor de C.A. a tensión plena.

Al presionar el botón de arranque se energiza la bobina del arrancador M cerrando los contactos. Al liberar dicho botón se mantiene el camino de la corriente a través del contacto M en paralelo con aquél. A este último diagrama se le conoce como el perteneciente al circuito de control.

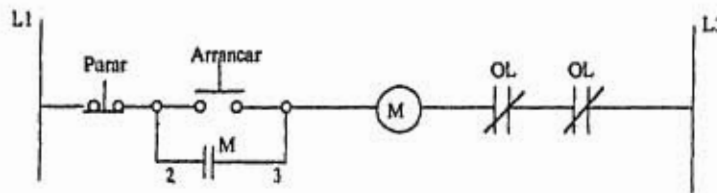


FIG. 3.8 Diagrama lineal de control de un motor de C.A. a plena tensión.

Si ahora queremos utilizar elementos de control de estado sólido, lo ideal es el uso de TRIACS dada la naturaleza de la alimentación. Estos harán las veces de los contactos del arrancador M; lo que correspondería al circuito de control, tal vez difiera un poco.

Como se recordará, el estado de conducción del TRIAC se inicia con un pulso en su puerta. Dicha señal puede ser obtenida directamente de la línea de alimentación de la carga o a través del secundario de un transformador conectado a la misma línea, y consiguiéndose una independencia en cuanto a disturbios por parte del control. Por otra parte, existen circuitos de control sumamente sofisticados que brindan un manejo brillante de las máquinas, pero:

- Puede implicar un costo elevado que sólo es redituable emplearlo en máquinas que requieren ese control debido a su uso y sobre todo por su costo;
- Su uso está fuera de la idea de este trabajo.

El circuito utilizando elementos sólidos podrá ser el mostrado en la figura 3.9. el cual es de los más sencillos. En este circuito Z está formado por una resistencia y una capacitancia en serie de modo de poder anular el efecto inductivo del motor sobre el TRIAC y que provocaría un retraso en la señal de cierre propiciándose armónicas y pérdidas por cierre tardío. Por otro lado, el valor de las resistencias deberá ser calculado para que permitan el paso de la corriente mínima de orden de cierre (IH). En cuanto a la formación de la estrella con los circuitos de control, obedece a la idea de tener presente en la puerta únicamente la señal senoidal correspondiente a dicha fase; y para conseguir esto es necesario que los elementos de cada bloque sean iguales. A su vez, estos dependen de los requerimientos de señal de cada TRIAC, por lo que es

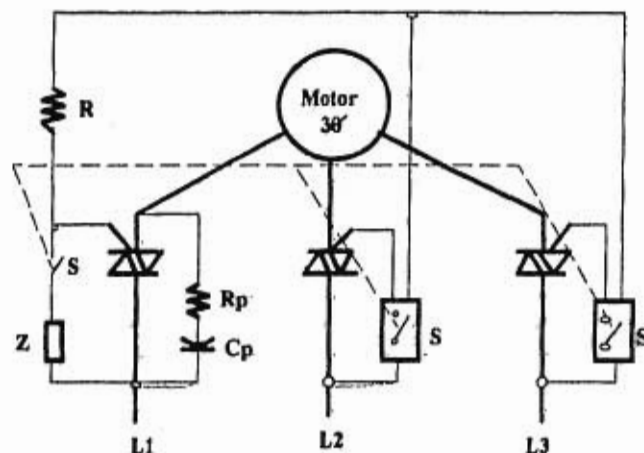


FIG. 3.9 Circuito de control simplificado empleando elementos de estado sólido.

recomendable que sean iguales. El papel de R es el de proporcionar el voltaje de puerta requerido para el flujo de la señal. Con objeto de disminuir los factores di/dt y dv/dt aplicados al TRIAC, se han puesto R_p y C_p en paralelo. El cálculo de sus valores recomendados puede obtenerse de la nota AN-4745 de la RCA.

- POR RESISTENCIA PRIMARIA.

Uno de los grandes problemas que presentan los motores de inducción es el efecto que tiene la corriente de arranque sobre el voltaje en la línea; esto es más notorio en motores grandes con fuertes corrientes de alimentación.

Este método utiliza una unidad de resistencia conectada en serie con el estator, con objeto de limitar y reducir la corriente en el arranque; se desconecta cuando el motor alcanza cierta velocidad, funcionando entonces el motor a pleno voltaje.

En la figura 3.10 se muestra el diagrama o circuito de control junto con el de potencia utilizando dispositivos electromecánicos. Cuando se oprime el botón de arranque, se cierra el circuito entre L1, el botón de paro, el de arranque, la bobina M, los contactos de los relevadores de sobrecarga OL's; se energiza la bobina M y cierra los

contactos de potencia M, y acciona el contacto de retención M (o de cierre retardado). Cuando esto ocurre, el motor es conectado a la línea a través de las resistencias; como la caída de potencial en ellas es proporcional a la corriente de arranque ($E=I \cdot R$), esto provoca que no todo el voltaje se aplique al motor, reduciendo su corriente de arranque y su par. Al acelerar el motor, se disminuye aún más la corriente de arranque y con ello aumenta el voltaje aplicado al motor.

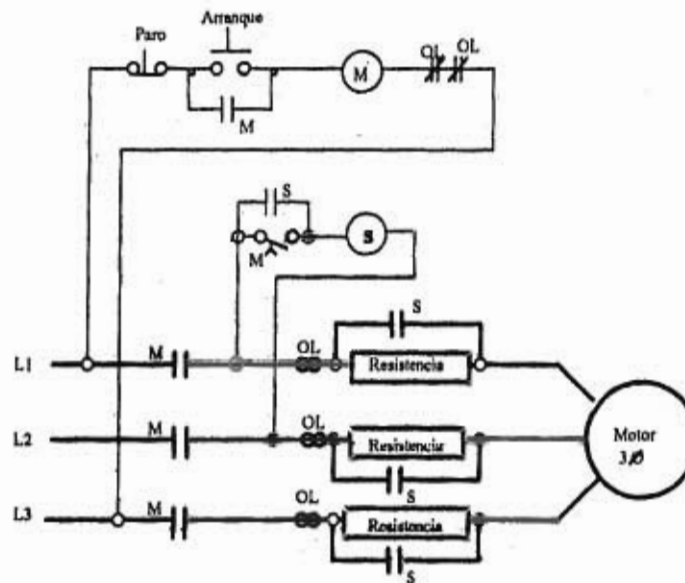


FIG. 3.10 Diagrama de conexiones del control de motor de C.A. utilizando arranque a tensión reducida.

Después de un tiempo definido, el contacto de retención M se cierra, alimentando la bobina S que a su vez cierra los contactos de potencia S, cortocircuitando las resistencias (es un modo de desconectarlas sin hacerlo físicamente) y aplicando todo el voltaje a las terminales del motor. El botón de paro controla directamente la bobina M, de modo que al oprimirlo, la desenergiza, se abren los contactos M, desconectando a la vez la bobina S y desenergizando tanto el circuito de control, como el del motor. Este método al igual que los siguientes son aún muy comunes en la industria por la facilidad en su instalación y reparación, ya que no requiere para ello personal muy especializado.

- POR AUTOTRANSFORMADOR.

En este método, la reducción de voltaje en el arranque se consigue a través de un par de autotransformadores conectados en delta abierta. En el caso de máquinas muy grandes, aún con los dos transformadores se presentan ciertos trastornos en la línea, además que de por sí existe un desequilibrio en el voltaje del motor que produce una variación del torque del 10% aproximadamente. Es por eso que también en algunos casos se utiliza un sistema de 3 autotransformadores en conexión estrella. Esto es mostrado en la figura 3.11. Para el caso de 2 autotransformadores, se puede conseguir que actúen durante el tiempo de arranque y después queden fuera mediante el control mostrado en la figura 3.12. Con este arreglo, se consigue lo conocido como transición abierta pues en el momento del cambio el motor se desconecta totalmente de la línea por un instante. Para evitar esto, se ha diseñado un circuito similar, conocido como de transición cerrada y que consiste en controlar los contactos S* por medio de otro contactor (que no se está indicando) que deberá estar intercalado entre S y R de la figura 3.12; el resto de la secuencia es igual y se enuncia enseguida.

Al presionar el botón de arranque, se energiza TR con contactos instantáneos y de retención de apertura y cierre. Se cierra el contacto TR en paralelo con el botón, manteniéndose así la continuidad al momento de liberarlo. A la vez se energiza S a través del contacto de apertura retardada TR y del contacto NC de R. Se cierran los contactos S y el motor se alimenta a través de los autotransformadores.

Cuando se cumple el tiempo de apertura de TR, al mismo tiempo se cierra TR'. Se desenergiza S y abre los contactos NA y cierra los NC como el que antecede a la bobina R, permitiendo que se energice y cierre los contactos R y conectando al motor directamente a la línea.

Por otra parte, una de las limitantes en cuanto al empleo de este tipo de arranque con contactores estáticos es su gran susceptibilidad a las variaciones de cargas inductivas. De hecho el empleo de semiconductores para control de motores de inducción de grandes capacidades deja mucho que desear debido al mal aprovechamiento de la alimentación motivado por la dificultad que presenta la

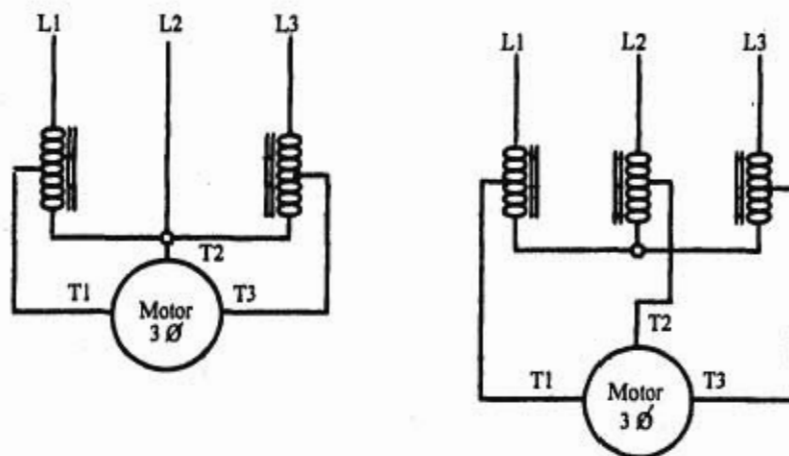


FIG. 3.11 Conexiones del circuito de potencia usando dos y tres autotransformadores.

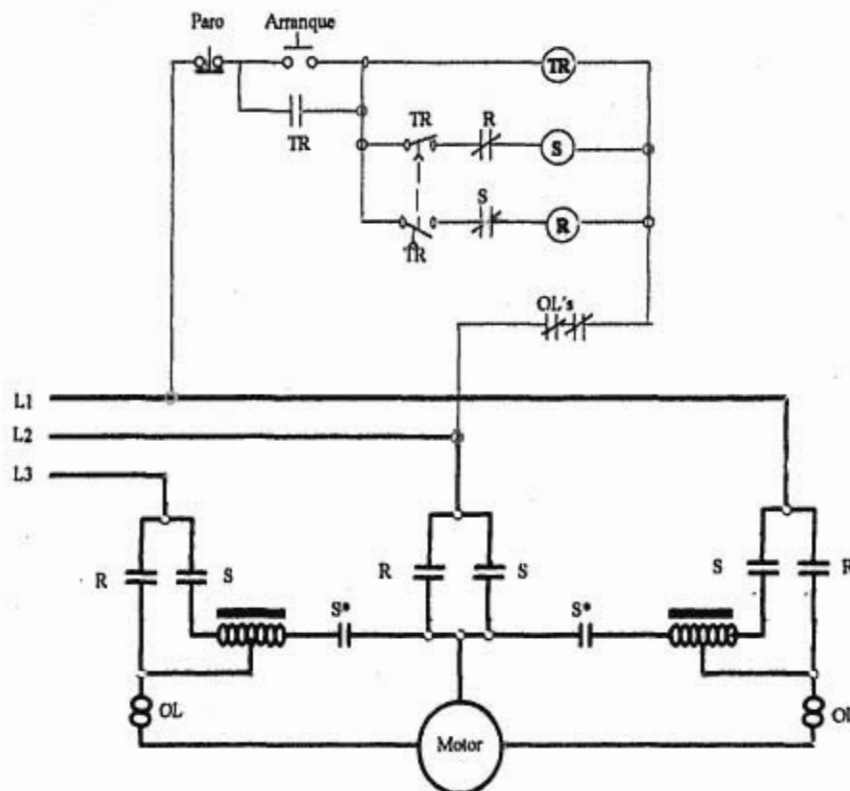


FIG. 3.12 Diagrama de conexiones para el control de motor trifásico de C.A. usando el método de arranque a tensión reducida a través de autotransformador (de dos devanados).

sincronización entre el cierre y cambio de dirección de conducción con el cambio de sentido de la alimentación. Sin

embargo se han diseñado circuitos especiales de sincronización y otros circuitos de control que ayudan a contrarrestar las dificultades de los elementos estáticos, con su correspondiente aumento de costo.

-ARRANQUE ESTRELLA-DELTA.

Este método fue puesto de moda por algunas casas europeas. Para poderlo implementar se requiere que el motor tenga ambos extremos de cada fase en las terminales exteriores. Además poseer arrancadores que tengan el número de contactos suficientes.

La velocidad del motor en estrella-delta depende únicamente del número de polos de los devanados del estator, y de la frecuencia de la línea de alimentación, siendo ambos constantes; el motor funcionará a la misma velocidad con cualquier conexión. La oleada de corriente en el arranque resulta menor con la conexión estrella que cuando se conecta en delta; en cambio la corriente del embobinado es menor que la de la línea cuando se conecta en delta.

Al igual que el anterior método, aquí también existe la situación de transición abierta o cerrada al momento del cambio de funcionamiento; en cualquier método se hablará de una transición cerrada con el entendido que se ha comprendido la transición abierta descrito en el método anterior.

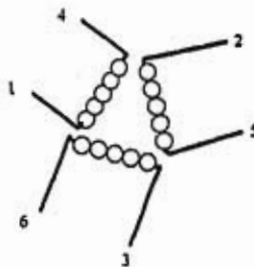


FIG. 3.13 Esquema simplificado del devanado trifásico de un motor de C.A. donde se codifican las terminales de cada fase. Esto es útil para el arranque estrella-delta.

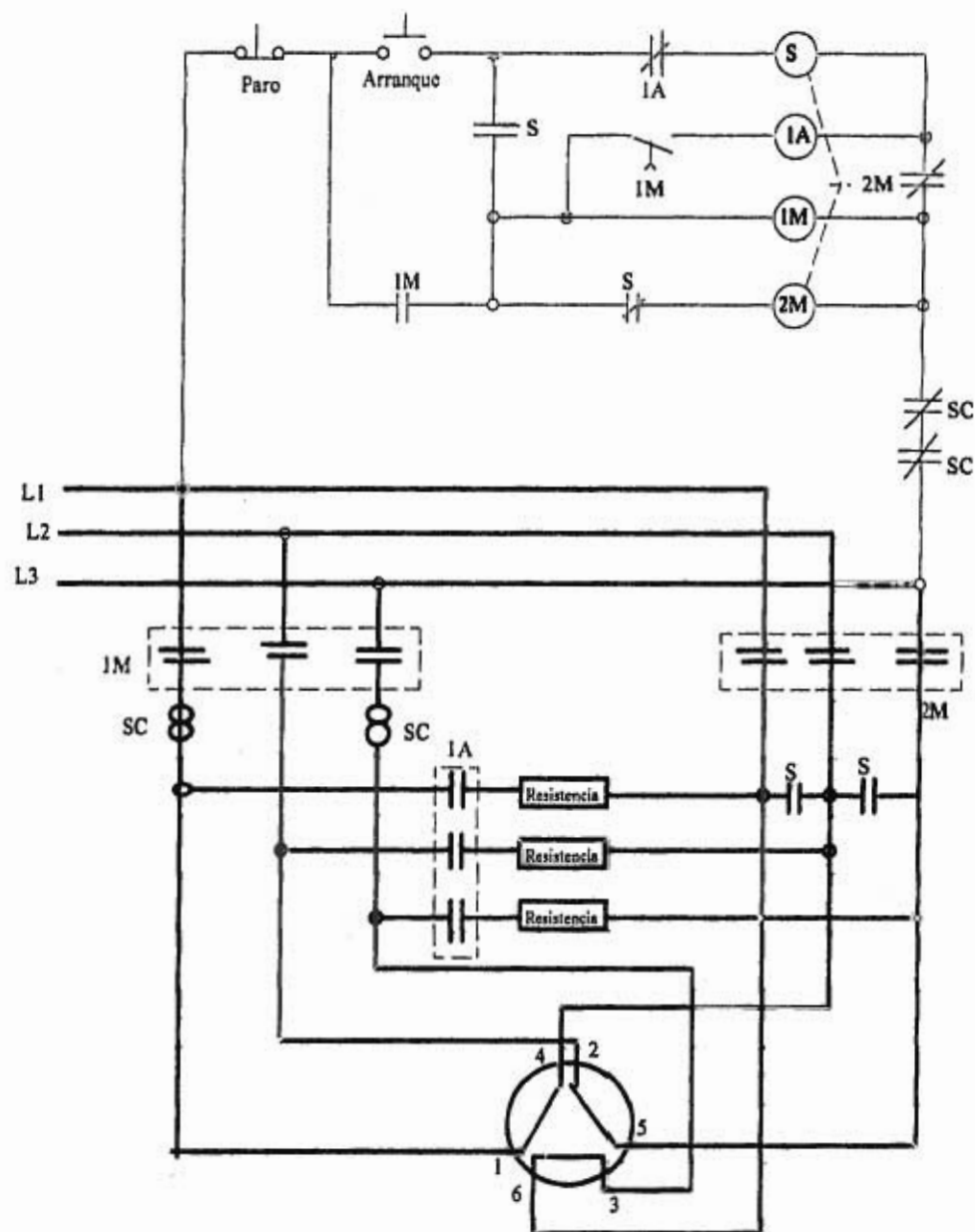


FIG. 3.14 Diagrama lineal de control y de potencia del método estrella-delta. La transición cerrada se lleva a cabo a través de resistencias.

Si se parte de una secuencia, se codifican las terminales de los devanados y se ve que es necesario unir

las terminales de 4, 5 y 6 entre sí para obtener la estrella (ver el esquema de los devanados en la figura 3.13), y conectar 1, 2 y 3 a cada línea. Para obtener la delta se necesita desunir 4, 5 y 6 y unir las así: 1 con 6, 4 con 2 y 3 con 5. A la vez mantener las líneas de alimentación en las mismas terminales. Por otra parte, teniendo presente la razón de la transición cerrada, en el instante de la eliminación de la estrella, se deben intercalar momentáneamente resistencias (o pueden ser autotransformadores) con objeto de:

- a) Evitar perturbaciones a la línea por la desconexión conexión.
- b) Mantener energizados los devanados.
- c) Iniciar la conexión delta con voltaje reducido.

Con base en lo anterior se llega al circuito de la figura 3.14. La manera en que entra en operación es la siguiente:

Al presionar el botón de arranque, se energiza S; se cierran los contactos NA de S y se abren los NC; se energiza 1M y se impide que 2M lo haga; se cierran los contactos NA de 1M y se conecta al motor en formación estrella; a la vez se mantiene el suministro de alimentación del circuito de control aún después de la liberación del botón de arranque; se inicia el cierre del contacto de retardo 1M que antecede a 1A; al cumplirse su tiempo (el cual es regulable) se cierra, energiza a 1A, se cierran los contactos NA y abre los NC; conecta las resistencias a la línea, iniciando la conexión delta; desenergiza a S liberando sus contactos, eliminando la conexión estrella y permitiendo la energización de 2M; por último se cierran los contactos 2M de potencia terminando de formar la conexión delta y cortocircuitando las resistencias. A la vez se interrumpe la alimentación a 1A y S. Al presionar el botón de paro, se interrumpe totalmente el circuito de control y retorna a las condiciones iniciales. Se recomienda que una vez interrumpido el sistema, se deje transcurrir un período de tiempo para permitir el restablecimiento de los contactos de cierre retardado.

- ARRANQUE POR DEVANADO BIPARTIDO.

Este método es sólo aplicable cuando se cuenta con motores de embobinado parcial, iguales a los normales en apariencia pero teniendo dos devanados idénticos que se pueden conectar en secuencia a la línea de alimentación de energía. Al igual que los anteriores, la idea fundamental de este método es la de reducir la corriente durante el arranque. Para esto, se conecta primero uno de los devanados en estrella a la línea; con esto el motor toma

aproximadamente dos tercios de la corriente normal con el rotor bloqueado, y desarrolla aproximadamente la mitad del par de torsión normal con rotor bloqueado.

Antes de describir el diagrama de control se verá cómo deben estar los devanados del motor; para ello se tiene el diagrama de la figura 3.15 en donde se muestra en forma esquemática un ordenamiento de lo que serían los arrollamientos del estator. Cada arrollamiento comprendido entre dos terminales representa una fase la cual puede estar formada por dos o más polos, según el diseño. Aunque este motor puede funcionar en doble estrella o doble delta, el método sólo es aplicable en la forma de doble estrella.

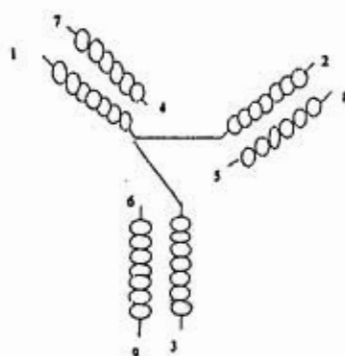


FIG. 3.15 Esquema simplificado de un motor con embobinado parcial trifásico.

Para esto el motor ya debe traer una estrella formada y tener en las terminales externas los demás extremos de los devanados. Externamente se forma la segunda estrella conectando entre sí las terminales 4, 5 y 6. Durante el arranque únicamente se conectan a la línea las terminales 1, 2 y 3 y en cuestión de 2 a 6 segundos se deberán conectar las terminales 7, 8 y 9 en correspondencia con las anteriores. Es importante identificar las terminales antes de iniciar cualquier conexión pues un error puede ocasionar la existencia de dos campos girando en sentidos opuestos. El diagrama lineal es el mostrado en la figura 3.16.

Al oprimir el botón "arrancar", se energiza la bobina del contactor S y cierra todos sus contactos S, conectando el primer devanado a la línea y energizando el relevador de

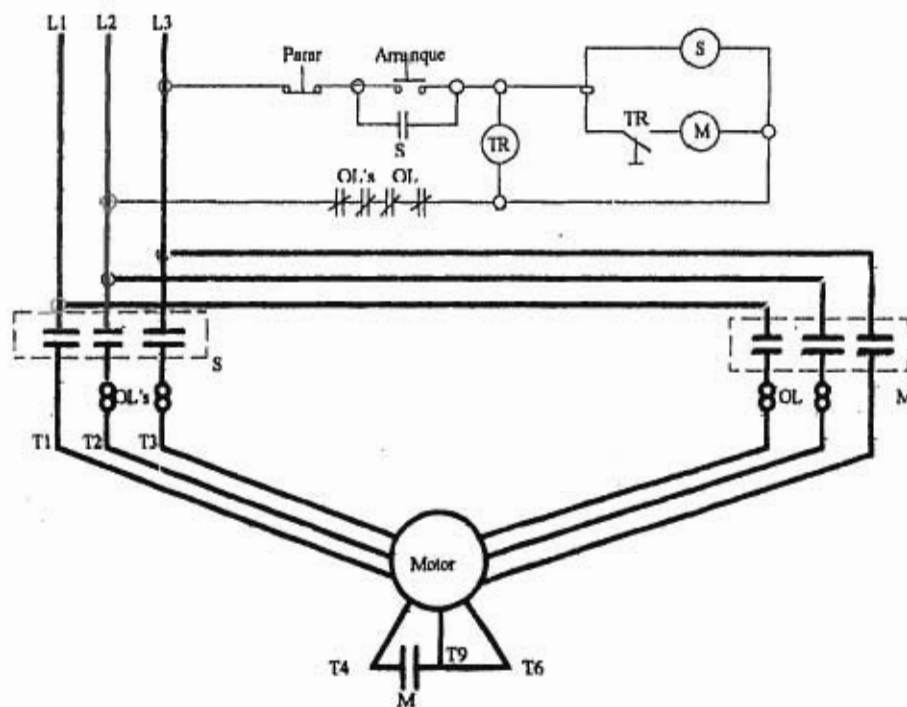


FIG. 3.16 Diagrama lineal y de potencia del control de arranque de un motor trifásico por el método del devanado bipartido.

tiempo retardado TR; al transcurrir el tiempo establecido, cierra el contacto TR y energiza la bobina M conectando la segunda estrella a la línea. Esta última etapa corresponde al período de marcha.

Para desconectar el sistema basta con presionar el botón de paro para desenergizar todas las bobinas, abriéndose todos los contactos. Este tipo de arranque se recomienda en motores que impulsan cargas centrífugas.

- ARRANQUE POR MANDO SÍNCRONO.

Con base en la electrónica, se han desarrollado métodos para controlar aún más las condiciones al momento de iniciar el funcionamiento de un motor. El método de arranque por mando síncrono es aplicable a los descritos anteriormente. El principio de este método es el de iniciar la conducción del TRIAC en las cercanías del punto cero del voltaje de alimentación. Para ello el circuito deberá contar con:

- Un detector de cero de tensión.
- Un comparador Q que enviará su señal sólo cuando el detector indique un paso por cero de la tensión.
- Un interruptor de mando S que influya sobre el comparador; cuando S esté cerrado (ver la figura 3.17), Q estará inhibido y no habrá corriente de puerta.
- Un generador de corriente de puerta, controlado por el comparador. El diagrama de bloques para una carga monofásica sería el mostrado en la figura 3.17.

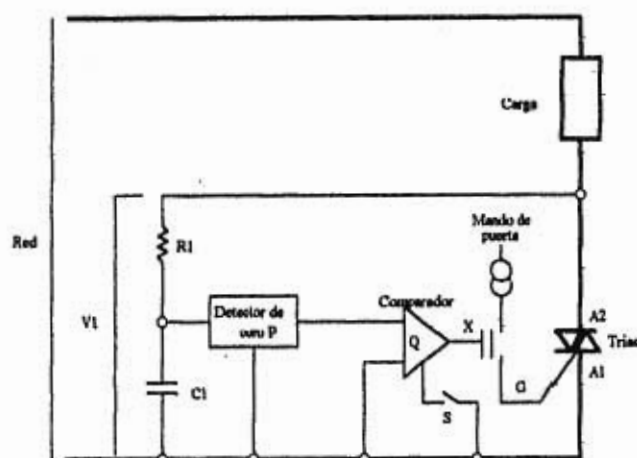


FIG. 3.17 Diagrama de bloques de un controlador de arranque por mando síncrono para una carga monofásica.

La función de C1 es la de proporcionar un desfase con objeto de asegurar el disparo efectivo del TRIAC (el impulso de mando llega cuando recién inicia la tensión en las terminales).

En la figura 3.18 se muestra el circuito de un interruptor síncrono obtenido de la bibliografía. En él se ven modificaciones con la de Tr1 que provoca una independencia del circuito de control respecto a la carga. Otra forma de conseguirlo sería a través de optoacopladores que no se describen aquí.

La parte del circuito que hace las veces de detector de cero y comparador, es la correspondiente al puente rectificador P alimentado por el secundario de Tr1 a través de R1 y C1; el transistor T1 funciona como amplificador de tensión sobre el resistor R3 mientras la tensión alterna en Tr1 sea superior a la tensión de umbral V_s (proporcional a la tensión directa base-emisor V_{be} de T1 y que es

aproximadamente igual a $V_s = V_{be} \cdot (R_1/R_2) \cdot (1/n)$ donde n es la razón de transformación de Tr_1 , el transistor conduce y mantiene baja la tensión V_x de salida. Si S está abierto, V_x subirá a $+V_a$ durante los cortos intervalos de tiempo en que V_{Tr1} es inferior a V_s . T2 funciona como un transistor suplementario controlado por medio de las condiciones en X. La alimentación de C.C. se toma también de la red a través de Tr , del puente P y del filtro RC y está indicada por V_a . Por otro lado, con la inclusión de un transformador de impulsos Tr_2 entre el transistor suplementario y la puerta del TRIAC auxiliar, se tiene todo el circuito de mando aislado de la red.

En cuanto al circuito de potencia, la parte de mando controla un TRIAC auxiliar que a su vez toma la alimentación de la puerta del triac principal después de la carga, y se instala un circuito RC en paralelo con éste, para contrarrestar los efectos inductivos del motor. Uno de los

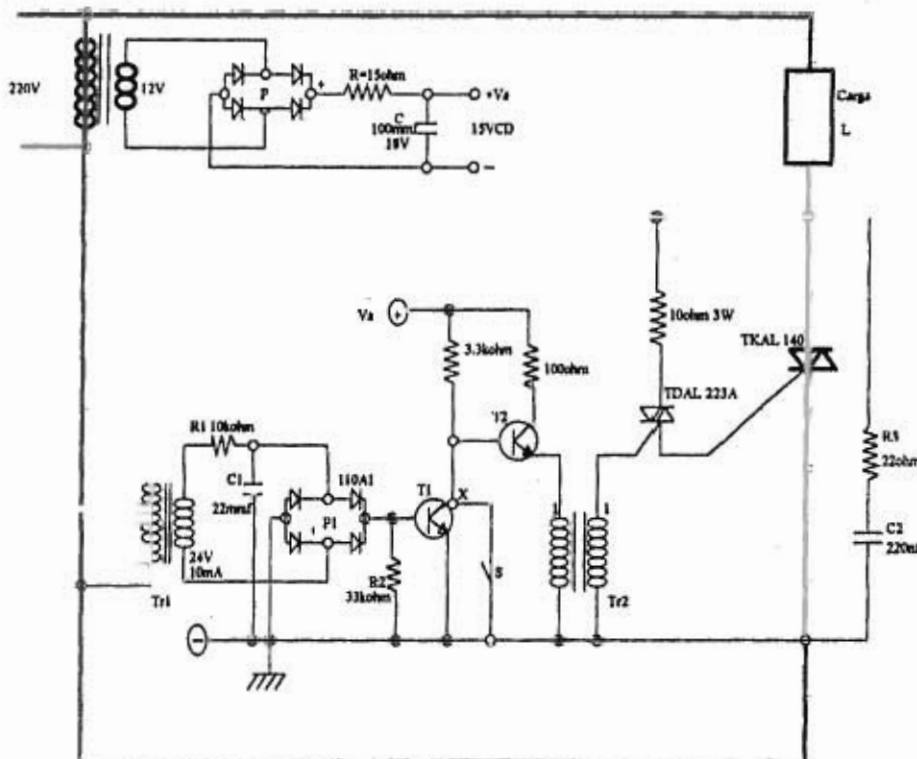


FIG. 3.18 Diagrama de un interruptor síncrono.

inconvenientes de este tipo de control, es la dificultad de los TRIACS a responder al cambio de polaridad de la tensión entre electrodos. Si se graficara la tensión presente en la carga, se vería una como la mostrada en la figura 3.19. Si el tiempo lograse ser considerable, se podrían provocar armónicas dentro del devanado, con el consiguiente aumento en pérdidas por corrientes parásitas. Esto se puede regular a través de resistencias (R1 y R2).

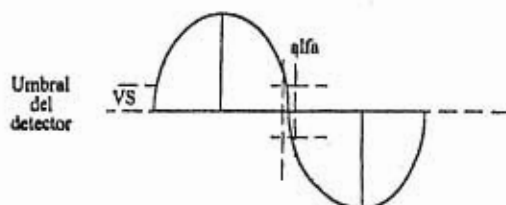


FIG. 3.19 Gráfica de tensión presente en la carga de la figura 3.18.

Cabe aclarar que existen una gran diversidad de circuitos que en apariencia difieren del anterior, sin embargo el principio básico es igual.

3.4.2 CONTROL DE MOTORES DE C.A. DE ROTOR DEVANADO.

Una de las grandes ventajas que posee este tipo de motores es su facilidad para controlar las corrientes de arranque y su velocidad y aceleración inicial, sin afectar su alto torque. Esto lo hace común en aplicaciones industriales que requieren arranques bajo carga.

Se ha visto que en un motor de inducción el control de la corriente de arranque se hacía intercalando impedancias entre la fuente y el devanado; basándose en el circuito análogo se ve que prácticamente es un transformador con el secundario en corto circuito; en el caso del motor con rotor devanado, el secundario estaría formado por el rotor y del cual se puede obtener una de las terminales de cada fase. Hay que recordar que en un transformador el producto de la ecuación $E_1 \cdot I_1 = E_2 \cdot I_2$ debe cumplirse. Cuando el movimiento del rotor es nulo, el motor se puede comparar con un transformador, concluyéndose que

controlando la resistencia del secundario, es decir del rotor, se puede controlar también la corriente de entrada en el primario, es decir en el estator. Con esto también se controla la velocidad como algo adicional.

Existen bastantes circuitos diseñados para muy diversas aplicaciones. Aquí se mencionan dos: el que utiliza un solo grupo de resistencias y el que emplea los elementos sólidos. Con dispositivos electromecánicos, el diagrama sería el mostrado en la figura 3.20 usando resistencias. Al momento del arranque, la bobina M cierra los contactos M. A la vez se inicia el accionamiento del cierre retardado de TR. El motor empieza a funcionar con los devanados del rotor cortocircuitados a través de un grupo de resistencias; de este modo se limita la corriente en el estator. Al concluir el tiempo de TR, se acciona S y sus contactos se cierran, eliminando las resistencias y colocando al motor en condiciones de funcionamiento normal, tal como lo estaría un motor de inducción.

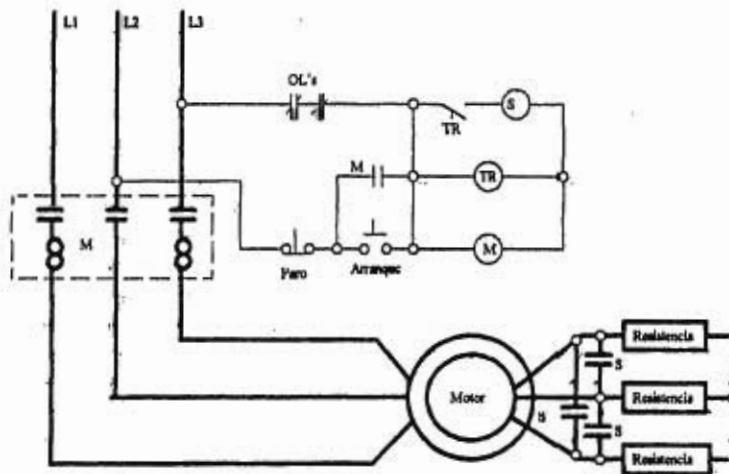


FIG. 3.20 Diagrama lineal de un circuito de control para un motor de rotor devanado.

A este circuito se le puede añadir un sistema de regulación de resistencias más moderado. Para ello se pueden usar varios grupos de contactores y relevadores S y TR que cortocircuiten el mismo número de grupos de resistencias; o bien por medio de un mecanismo de reloj con resistencia regulable con un pequeño motor. O también se puede diseñar de modo que sea factible la selección de velocidad de funcionamiento por medio de la conexión

permanente de resistencias. Para ello se requieren varias estaciones de botones que se auto-bloqueen al estar una en uso.

La variación de la resistencia por medio de elementos sólidos se puede llevar a cabo mediante un circuito interruptor de alta frecuencia. Además, este método proporciona un ligero control de la velocidad. Para todo ello, la potencia de deslizamiento del rotor se rectifica y alimenta a una resistencia R externa a través de un interruptor de alta frecuencia T y se suaviza a través del

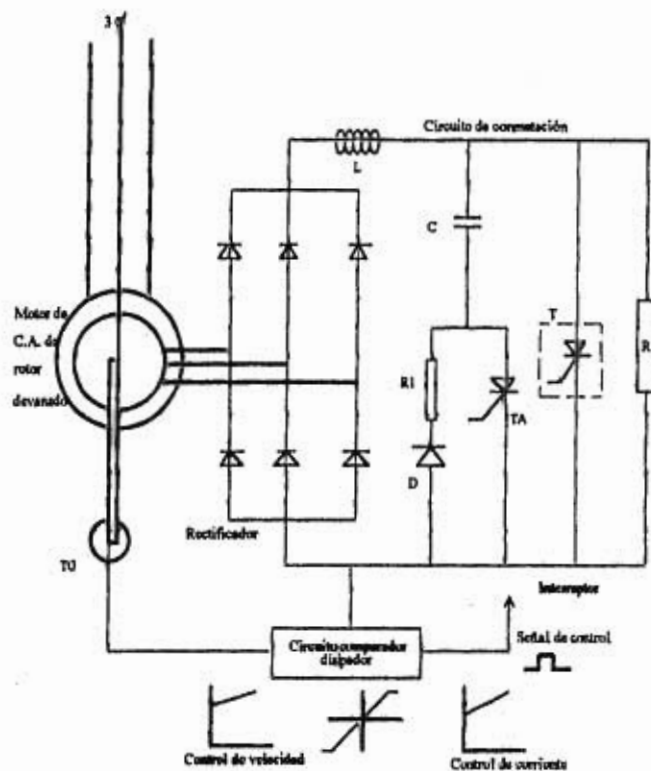


FIG. 3.21 Circuito controlador de la variación de resistencia en el devanado del rotor empleando elementos de estado sólido.

reactor L . La resistencia $R1$, el diodo D , el capacitor C y el thyristor auxiliar Ta forman el circuito de conmutación. La función del reactor L consiste en aislar las armónicas que se generan de la rectificación de la potencia.

Básicamente el papel del circuito comparador-disparador es la de controlar la conexión y desconexión de la resistencia principal R; para ello al disparar T se obtiene la desconexión de R. El circuito se alimenta de la señal proveniente de TG por un lado, y del circuito de conmutación por otro; realiza una comparación de acuerdo a un patrón ya establecido y ordena la apertura o cierre del thyristor. Dicho patrón puede ser el establecimiento de una velocidad a través de una señal representativa (de voltaje o de resistencia, por ejemplo) y que se comparará con la proveniente de TG como primer paso; una vez tenida la señal de control de velocidad, se pasará a la obtención de la regulación de corriente en el circuito de conmutación. Como se sabe, en estos motores, la corriente de rotor depende de la resistencia que presente su circuito, y su variación proporciona una variación de la velocidad; de estas comparaciones se emite una señal de disparo del thyristor T. La composición de los circuitos antes mencionados puede ser una combinación de varios mandos síncronos.

El uso de este método ofrece algunas desventajas, como:

- 1.- El voltaje de conmutación se deriva del rectificador y por lo tanto es extremadamente menor a bajas frecuencias y puede no ser suficiente para una conmutación efectiva. Mas aún cualquier circuito de conmutación operando bajo tales condiciones producirá pérdidas excesivas a altas frecuencias. Esta limitación restringe seriamente el rango de control de velocidad obtenible.
- 2.- Este método de control de la velocidad da por resultado una eficiencia pobre en todo el motor y es altamente anti-económico. La mayor parte de la potencia eléctrica que consume el motor del sistema se disipa en las resistencias del rotor. A bajas velocidades, prácticamente se pierde toda la potencia a través del rotor.
- 3.- Debido a las anteriores desventajas, este método se puede utilizar solamente durante un rango muy reducido.
- 4.- Las velocidades supersíncronas no son posibles.

3.5 CONTROL DE LAS MÁQUINAS SÍNCRONAS.

Para llevar a cabo un desarrollo de algunos controles de estas máquinas, es necesario recordar que pueden emplearse como máquinas motrices, es decir que entregan energía mecánica, y como máquinas generadoras de energía eléctrica. Además en muchas industrias desempeñan doble función: la motriz y la de correctoras de factor de potencia.

3.5.1 MOTOR SÍNCRONO.

Como se dijo con anterioridad el motor está compuesto de un devanado en el estator formado por tres arrollamientos y alimentados por una señal trifásica, produciendo un campo magnético giratorio; un devando en el rotor formando el mismo número de polos del estator y alimentado por una señal de C.D. y proveniente de una fuente externa a través de anillos rozantes o de un grupo generador montado en la misma flecha. Como estos motores no pueden iniciar su movimiento desde cero, algunas máquinas están provistas de un devanado de inducción, con objeto de producir el movimiento inicial hasta las proximidades de la velocidad síncrona (95% ó más) aplicándose hasta entonces la C.D. a las bobinas de campo del rotor formando los polos norte y sur, los cuales son atraídos por los del estator y acelerando al rotor hasta ponerlo en sincronismo.

Por otra parte, como se sabe, el factor de potencia es relación entre la potencia real que usa un circuito, expresada en Watt, y la potencia aparente de la línea expresada en Volt-Ampere (producto de los volts aplicados por los amperios registrados en el circuito). La mayoría de las cargas de C.A. tienen factor de potencia retrasado y aumentan los costos de operación.

De las gráficas de la figura 3.22 se ve el efecto sobre la línea de alimentación, que ejercen los diferentes tipos de cargas. Un motor síncrono sobreexcitado es el que funciona con un factor de potencia de signo contrario al proporcionado por las cargas inductivas. Esto es, proporciona un factor de potencia adelantado. En la gráfica inferior, se muestra el comportamiento de un motor a partir de ciertos porcentajes en las corrientes respectivas y con cambios en la carga.

Para el circuito de control, existen al igual que en todos, muy diversos diseños. En la figura 3.24 se ilustra uno de ellos: el que utiliza un relevador de frecuencia de campo polarizado. Las partes principales lo constituyen:

- El contactor de campo F, que abre ambas líneas de alimentación al campo del rotor, y proporciona un circuito cerrado de dicho campo a través de una resistencia de descarga durante el arranque.
- El relevador "fuera de fase" OSR, cuya función es de protección. Cuando el motor se encuentra funcionando durante un período prolongado (de más de 10 segundos) a una velocidad diferente a la síncrona, se inducen corrientes en el devanado de campo del rotor, las cuales son registradas

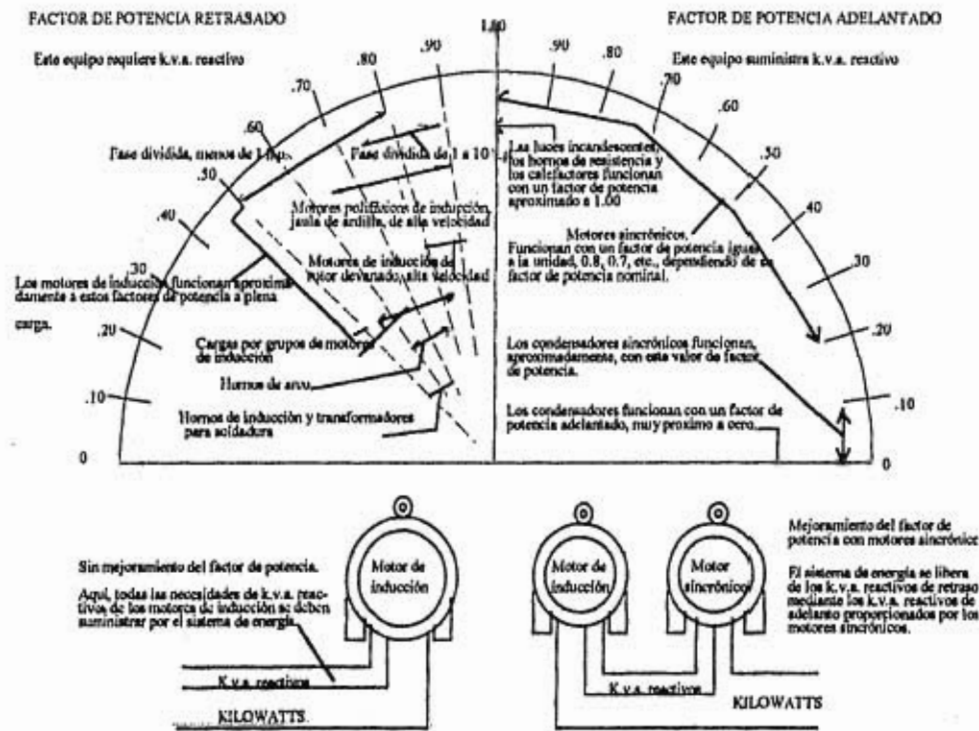


FIG. 3.22 Funcionamiento de una máquina síncrona en sus dos modalidades.

por este relevador y van en proporción con las existentes en la jaula de ardilla. Cuando estas corrientes llegan a valores determinados por un ajuste en el núcleo del relevador, se abrirán los contactos del OSR y se interrumpirá el circuito de control de la alimentación del estator.

- Relevador de frecuencia de campo polarizado RFP. Es la parte principal del circuito y es el responsable directo de la etapa de transición de C.A. a C.D. en el rotor. Como lo muestra la figura 3.23 está compuesto de un núcleo magnético excitado por dos solenoides, uno de C.D. (C) y el otro de C.A. proveniente del campo inducido (B) y por una armadura abisagrada (A) con el contacto (S). La bobina (C) establece un flujo constante a través de la armadura, el cual junto con el producido por B se suman y oponen según la porción del ciclo de B. Cuando se oponen, se produce un aumento de flujo en (A) que mantiene cerrada la bisagra; pero cuando se suman (esquema b) el flujo resultante es relativamente débil. Es en esta parte del ciclo cuando la armadura del relevador abrirá. Cuando se alcanza la

velocidad sincrónica, la corriente en B disminuye en amplitud y se obtiene una onda más baja del flujo de la armadura, liberándose la armadura en el punto preciso (e indicado), y cerrándose entonces el contacto (S), lo que permite que se aplique la excitación de C.C. al campo, en la dirección mostrada por la flecha, de polaridad opuesta a la de la corriente del campo inducido y con objeto de compensar el tiempo requerido para desarrollar la excitación debida a la inercia magnética del devanado de campo del motor. La inercia es tal que la excitación de C.D. no resulta apreciablemente eficaz hasta que se invierte la corriente inducida (punto O en la onda) a la misma polaridad que la corriente directa. La excitación continúa aumentando

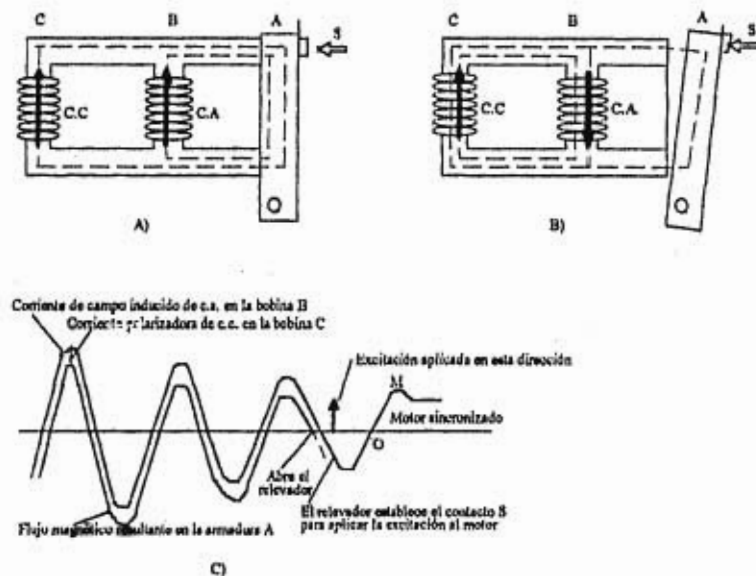


FIG. 3.23 Operación del relevador de frecuencia de campo polarizado RFP.

hasta que se sincroniza el motor, como se muestra en el punto M de la curva.

Algo importante es que durante el momento de sincronización suceden dos actos: se conecta el campo a la excitación de C.D. y se desconecta el campo de la resistencia de descarga y del relevador fuera de fase en forma simultánea.

Si una sobrecarga o una caída de voltaje hacen que el motor se salga de sincronismo, se produce un aumento en la

corriente con frecuencia de deslizamiento inducida en los devanados de campo. Parte de ella fluye a través de la bobina de C.A. del RFP, se abre el contacto y se elimina la excitación del campo de C.D. (a su vez vuelve a funcionar la resistencia de descarga y el relevador OSR), si las condiciones vuelven a la normalidad dentro del tiempo previamente establecido, y si el motor tiene suficiente torque, éste volverá a sincronizarse automáticamente; sin embargo, si continúan existiendo dichas condiciones de modo que no se pueda sincronizar el motor, entonces el relevador OSR, o los de sobrecarga, funcionarán y protegerán el motor contra sobrecalentamiento.

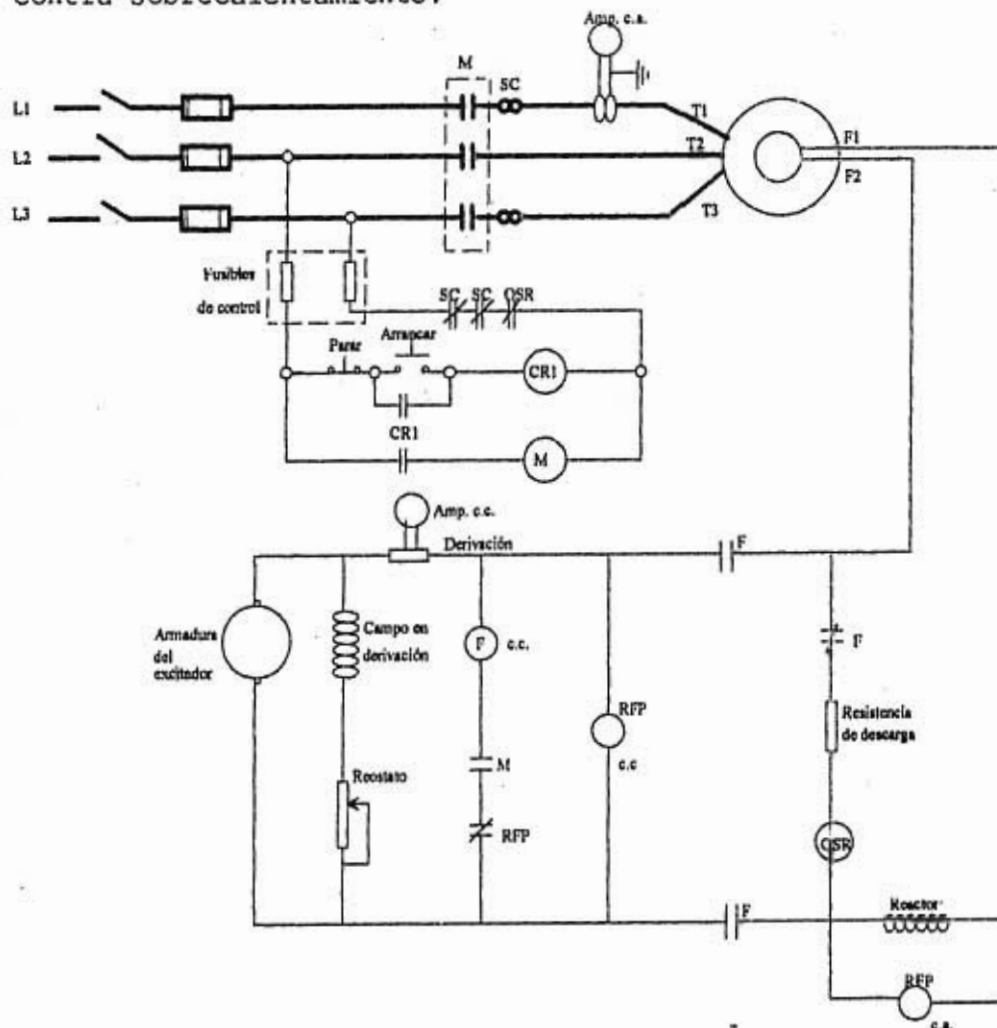


Fig. 3.24 Diagrama lineal para la operación automática del motor síncrono, utilizando relevador de frecuencia de campo polarizado.

El diagrama de la figura 3.24 contiene lo antes explicado. Además la parte de control de la alimentación de estator resulta casi idéntica a la tenida en los motores trifásicos de inducción. De esto se puede concluir que se puede aplicar los mismos métodos de arranque para estas máquinas en la porción del estator y tomando sólo en cuenta el tiempo requerido para alcanzar la velocidad de sincronización en el ajuste del tiempo del relevador OSR y más una ligera tolerancia no mayor de 6 seg.

En caso de utilizar sistemas estáticos, se tiene también un elemento en común: el relevador de frecuencia de campo polarizado, que en ocasiones también se le conoce como relevador de deslizamiento. El sistema de control contiene un conversor a base de thyristores cuyo ángulo de disparo se controla mediante un sistema de regulación. Variando el ángulo de disparo, la corriente de excitación puede ajustarse para mantener el factor de potencia deseado. El factor de potencia del sistema requerido y el factor real se comparan y el error se suministra como una señal de corrección al regulador del campo.

Sin embargo debe asegurarse que la corriente del estator no aumente más allá del punto que ponga al motor fuera de sincronía. En consecuencia es recomendable proporcionar una señal limitante del circuito del estator. Además, las señales limitantes de la corriente de campo se proporcionan en el regulador de la misma corriente, de modo que ésta puede limitarse a su valor extremo.

3.5.2 GENERADOR SÍNCRONO.

También conocidos como alternadores o generadores de corriente alterna, son la fuente más importante de energía eléctrica. De hecho, todas las grandes centrales eléctricas están formadas por un alternador de capacidad enorme.

En forma general, un alternador es idéntico en construcción a un motor síncrono. La diferencia estriba únicamente en que necesita estar conectado a un motor primario o pri-motor que proporcionará la energía mecánica que se transformará en energía eléctrica. Esta última tendrá un voltaje que depende del flujo en el entrehierro, de las bobinas o ampere-vueltas que constituyan a cada fase (por lo general se tienen 3 fases espaciadas 120 grados eléctricos), y del factor de potencia de la carga; el voltaje variará en el tiempo en una forma senoidal con una frecuencia que dependerá totalmente de la velocidad de

rotación del campo (del rotor y por lo tanto del que le proporcione el pri-motor).

Si se mantiene constante la velocidad de rotación y se aumenta la excitación del campo de C.D., el flujo magnético y por tanto, el voltaje aumentarán en proporción directa hasta un punto llamado de saturación. El encontrar la gráfica de saturación resulta una buena práctica de laboratorio.

El flujo magnético queda determinado por la suma vectorial de las fuerzas magnetomotrices del rotor y el estator. La del rotor suele ser mayor, pero como la del estator tiene un efecto tan importante en el flujo magnético, la regulación del voltaje de los alternadores resulta ser bastante mala por lo que la corriente de campo de C.D. se debe regular constantemente para mantener un voltaje constante en condiciones de carga variables.

Si una fase de un alternador trifásico tiene una carga grande, su voltaje se reducirá debido a las pérdidas por IR e IX en el devanado del estator. Esta caída de voltaje no se puede compensar modificando la corriente de campo de C.D., debido a que los voltajes de las otras dos fases también variarán. Por consiguiente es necesariamente esencial que los alternadores trifásicos no tengan cargas que estén muy desequilibradas.

Otro punto importante en el uso de los grandes alternadores, es la sincronización de éstos a un sistema o red general; para llevarla a cabo en forma suave es necesario como primer punto el que las frecuencias sean iguales. Además la secuencia de fases (o rotación) debe ser en el mismo sentido. El siguiente punto que se debe tener es que los voltajes deben estar iguales en valor durante cualquier momento antes y después de sincronizarse.

Como se mencionó antes, la frecuencia está directamente relacionada con la velocidad de rotación del campo. Si se conoce el número de polos que constituyen el estator del alternador, bastará multiplicar el número de revoluciones por segundo por la cantidad de pares de polos. Las revoluciones se pueden obtener a través de un simple tacómetro. Existen también frecuencímetros que se basan en el conteo de pulsos provocados por la generación de un voltaje en una bobina, por parte de un imán girando (acoplado en el eje del campo), o más aún por conteo de pulsos senoidales obtenidos del mismo estator.

En cuanto a la secuencia de fases existe un método sencillo para ello utilizando dos lámparas incandescentes y un capacitor conectados en estrella, como se muestra en la figura 3.25. Al conectarse al sistema trifásico, una de las lámparas brillará más que la otra. La secuencia de fase es: lámpara brillante, lámpara opaca, capacitor.

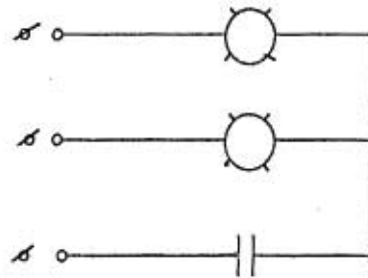


FIG. 3.25 Conexión de lámparas incandescentes útiles para la determinación de secuencia de fases.

Por otro lado, la compañía Solid State Products Inc. ha desarrollado un detector de fases en donde se supone que una fase A debe adelantar a otra B provocando un desfase adicional de 60° por medio de un capacitor y una resistencia de modo que la suma de las corrientes sea cero en el caso de cumplirse. Cuando lo anterior no sucede, la suma difiere de cero y se dispara un thyristor que puede alimentar una luz piloto o un dispositivo de señalización o conmutación. El diagrama mostrado en la figura 3.26 se obtuvo de la bibliografía.

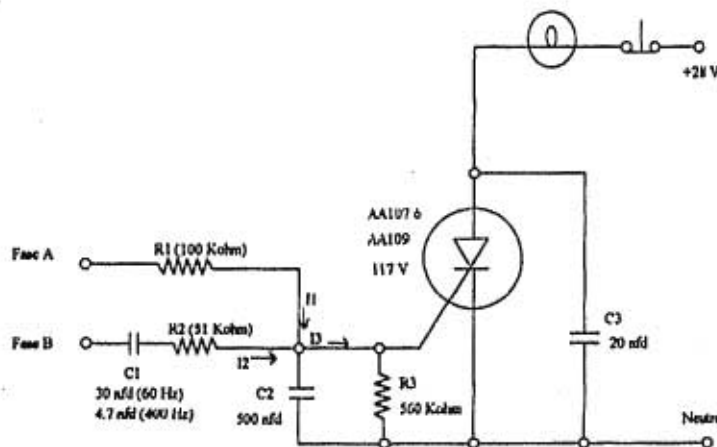


FIG. 3.26 Circuito detector de fases sencillo.

Dado que resultaría repetitivo en algunas partes el representar un diagrama general para el control de un alternador, en la figura 3.27 se muestra un diagrama de bloques del control de un alternador y su acoplamiento con un segundo, en el entendido que existen casas comerciales que se dedican a la distribución de aparatos didácticos e industriales especializados en llevar a cabo una función concreta dentro del conjunto.

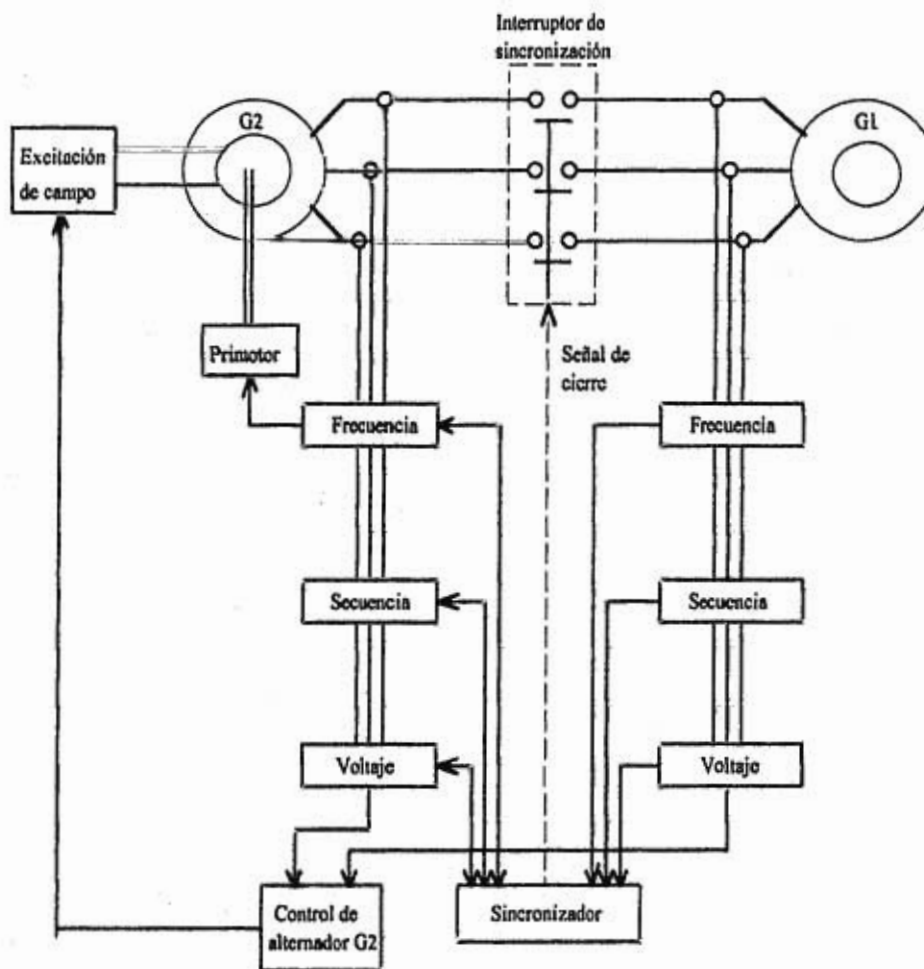


FIG. 3.27 Diagrama de bloques del control de un alternador y su acoplamiento a un segundo alternador.

CAPÍTULO 4
PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL TABLERO DE
CONTROL DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

En este capítulo se hace una reseña del uso común de las máquinas de C.C. Y C.A. y después se menciona la factibilidad de utilizarse en este proyecto. Se presentará un proyecto basado en circuitos expuestos que controlarán algunos tipos de máquinas también señaladas, y que, como propósito final se puedan realizar prácticas de laboratorio que permitan conocer las características de funcionamiento más importantes de dichas máquinas.

4.1. RESUMEN Y USOS DE LAS MÁQUINAS DE C.C..

Para las máquinas de C.C. en general su principal ventaja reside en la flexibilidad de funcionamiento y aplicaciones, y su principal desventaja es su costo. En cuanto a los generadores de C.C. su uso es ventajoso cuando el punto de consumo está cercano, y sólo cuando la distancia es considerable la conveniencia se inclina a los generadores de C.A.

De los distintos tipos de generadores de C.C. los más comunes son los de excitación independiente los cuales permiten una gran variación de la tensión de salida. En cambio, los generadores de C.C. de autoexcitación compuesta acumulativa tienen la desventaja de provocar inestabilidad al trabajar a tensiones bajas.

En cuanto a los motores, se tienen las siguientes características según su tipo:

MOTOR EN SERIE.

Sufre una notable disminución de velocidad al aumentar la carga, siendo su velocidad de vacío excesivamente alta. El par es proporcional al cuadrado de I , y a la potencia.

MOTOR DERIVACIÓN.

Con excitación constante trabaja a velocidad casi uniforme, disminuyendo un poco al aumentar la carga; el par es aproximadamente proporcional a la corriente del inducido; la regulación de la velocidad tiene un amplio rango actuando sobre el campo inductor, sobre la tensión del inducido o sobre ambos simultáneamente.

MOTOR DE EXCITACIÓN COMPUESTA.

Es un intermedio entre los anteriores.

4.2. CONSIDERACIONES SOBRE LA APLICACIÓN DE MOTORES DE C.A.

Se han mencionado las características de funcionamiento de los motores. En lo que respecta a sus aplicaciones, las determinan dichas características. Por ejemplo, usando doble jaula o barras altas los motores de jaula de ardilla presentan buenas características de arranque, debido a la alta resistencia del rotor, al mismo tiempo pueden poseer buenas características en marcha normal derivadas de una baja resistencia en el mismo. Aún así el motor carece de la flexibilidad que tienen los de rotor bobinado con resistencias exteriores; entonces éste deberá emplearse siempre que las exigencias del arranque sean muy severas. En general se dispone de motores de jaula de ardilla de diferentes potencias normalizadas hasta 200 Hp. y a distintas frecuencias, tensiones y velocidades. A mayor potencia se consideran como de uso especial.

La NEMA ha establecido tipos normalizado según las necesidades de arranque y marcha, siendo básicamente cuatro:

CLASE A: Par y corriente de arranque normales, con bajo deslizamiento, y rotor de jaula de baja resistencia. Buenas características de marcha a expensas del arranque. A plena carga el deslizamiento es poco y el rendimiento alto. Par máximo por encima del 200% del par a plena carga, existiendo poco deslizamiento. El par de arranque a plena tensión varía entre el 100% y 200% del de a plena carga. Principal inconveniente es su elevada intensidad de arranque (del 500% al 800% del valor nominal a voltaje nominal) por lo que motores con más de 7.5 Hp. deberán arrancarse a voltaje reducido; consecuentemente disminuyéndose su par de arranque. El motor tipo A es el clásico en el campo de potencias por debajo de 7.5 Hp., usándose a mayores cuando por algunos motivos sea difícil cumplir las limitaciones de la corriente de arranque de la clase B.

CLASE B: Par de arranque normal, intensidad de arranque y deslizamiento bajos. Tiene aproximadamente el mismo par de arranque que la clase A, pero con un 75% de la intensidad, usándose el arranque directo con plena tensión en una gama más amplia que con la clase A. La reducción de la intensidad de arranque se consigue mediante una reactancia de dispersión relativamente alta, manteniéndose el par con el empleo de rotores de barras altas o de doble jaula. El deslizamiento y el rendimiento a plena carga son buenos,

del mismo orden que en la clase A, sin embargo, la alta reactancia baja un poco el factor de potencia y apreciablemente el par máximo, consiguiéndose apenas superar el 200% del de plena carga. Este es el tipo más corriente en el campo de potencias comprendidas entre 7.5 y 200 Hp. empleándose principalmente en aplicaciones a velocidad constante sin grandes exigencias en el arranque tales como ventiladores, bombas y máquinas herramientas.

CLASE C: Par de arranque fuerte; intensidad de arranque bajo. En este tipo se emplea el rotor de doble jaula de mayor resistencia que en la clase B, de lo que resulta un par de arranque fuerte con poca intensidad, pero tiene menos rendimiento y más deslizamiento en marcha normal que los de la clase A y B. Su aplicación típica es el accionamiento de compresores y de transformadores.

CLASE D: Par de arranque fuerte; mucho deslizamiento. Este tipo generalmente tiene el rotor de jaula sencilla de gran resistencia, siendo las barras frecuentemente de bronce. Tiene un gran par de arranque con poca intensidad, y un par máximo elevado con 50% de deslizamiento, pero a plena carga trabaja con mucho deslizamiento (del orden del 7% al 11%) lo que supone un bajo rendimiento. Encuentra sus aplicaciones principales en el accionamiento de cargas intermitentes que representan fuertes aceleraciones o choques tales como en las prensas de punzón y cizallas. Cuando acciona cargas con impactos fuertes, en general el motor está auxiliado por un volante de inercia que disminuye las pulsaciones de potencia que repercuten en la red de alimentación. Para estos casos se requiere un motor cuya velocidad decaiga apreciablemente al aumentar el par, de forma que el volante pueda perder velocidad y ceder parte de su energía.

Básicamente existen dos tipos de elementos a utilizar: en estado sólido y el electromecánico. De estos dos, el que tiene mayor aceptación debido a su facilidad de adaptación, modificación y mantenimiento es el electromecánico. Como se recordará, se dijo que una desventaja de estos equipos es el consumo de energía eléctrica alto para realizar la función de control, la cual es considerable cuando el sistema es bastante complejo. Esto provocó que se iniciara el uso de los semiconductores en este renglón. En cuanto a México, el desarrollo de ellos ha sido en cierta forma lento, y su uso aún más, y en ocasiones más costoso.

El presente proyecto tendrá como principal enfoque la utilización de equipo electromecánico para la realización de prácticas de laboratorio. Además como será equipo cuyo trabajo no será constante, su consumo de energía no es representativo en los costos. A continuación se enuncian las clases de motores y los métodos más comunes de controlarlos.

1.- Motor de C.D.

+ A plena tensión.

+ A tensión regulable:

a) En el devanado de derivación.

b) En los bornes de la armadura.

-En el campo serie.

-En el campo en derivación.

c) Una combinación de los anteriores de b).

2.- Motor de inducción. En él, el arranque es el instante más importante del control. Estos son:

+ A plena tensión.

+ A voltaje reducido:

a) Por medio de resistencias.

b) Por medio de autotransformadores.

c) Estrella-delta.

d) Por devanado bipartido.

e) Arranque sincrónico.

3.- Máquina síncrona. Función como motor.

+ Método manual de arranque por inducción-marcha:

a) Arranque a plena tensión.

b) Arranque por resistencias.

c) Arranque por autotransformador.

d) Arranque estrella-delta.

4.- Máquina síncrona. Función como generador.

+ Método manual de puesta en marcha, con excitación controlada, identificación de secuencia y sincronización.

4.3. IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO.

A continuación se enuncia la serie de equipos necesarios para la implementación de los métodos en el anteproyecto del tablero.

4.3.1 MÁQUINA DE C.D.

Analizando los circuitos, se ve que el equipo requerido por ella se compone de los siguientes elementos:

+ A plena tensión: Independientemente de la forma de conexión de la máquina (serie, en derivación o derivación-

serie con un segundo campo), lo necesario es mínimo en este método y consta de:

- Fuente de C.D. (que puede ser una fuente convertidora C.A.-C.D. de voltaje constante y de estado sólido).
- Estación de botones (arranque-paro).
- Arrancador magnético de C.D.
- Relevador de sobrecarga con elemento térmico protector.
- Alambrería (se distinguen dos tipos: de potencia y de control).

Es muy recomendable que la fuente de C.D. sea diseñada para una capacidad mayor que la correspondiente al motor por cuestión de seguridad. Además, de esta misma fuente se tomará la alimentación del control, por lo que se precisa sea confiable.

+ A tensión regulable:

- Una fuente de potencia de C.D. (se pueden encontrar fuentes que contienen regulador de voltaje integrado y que puede servir como de voltaje constante y variable).
- Dos potenciómetros de igual o mayor capacidad que la del motor.
- Estación de botones (arranque-paro).
- Arrancador magnético de C.D.
- Relevador de sobrecarga con protección térmica.
- Alambrería (en todos los casos se necesitará este concepto por lo que en lo sucesivo se omitirá).

Como se tienen cuatro formas de conexión de un motor de C.D., sería recomendable contar con dos grupos de potenciómetros (4 unidades) con el fin de disponer de mayor variedad de regulación, pues se pueden realizar acoplamientos serie-paralelo para obtener mayor precisión en el control. En cuanto a su capacidad dependerá del motor.

4.3.2 MÁQUINA DE C.A. DE INDUCCIÓN.

Como es notorio, las máquinas de inducción son las más utilizadas para fines industriales dada su facilidad de mantenimiento. Cabe mencionar que dentro de este tipo de máquinas, se tienen varios modelos tales como de jaula de ardilla (monofásicos, bifásicos y trifásicos), de doble jaula de ardilla y de rotor devanado. De todos ellos se tomará en cuenta únicamente el motor trifásico de jaula de ardilla.

+ A plena tensión: Este método no puede usarse en máquinas mayores de 5 Hp. de capacidad por cuestión de seguridad. El equipo a usar sería:

- Arrancador magnético con 3 contactos de potencia y un contacto N.A. (normalmente abierto) para uso de control.
- Estación de botones.
- Relevadores de sobrecarga con contactos normalmente cerrados (N.C.).
- Fuente de potencia trifásica.

+ Voltaje reducido a través de resistencias:

- Un banco de resistencias (un grupo de 3 unidades cuyo valor oscilará entre 1 y 20 ohms, según la capacidad requerida por el motor).
- Un arrancador magnético provisto de 3 contactos N.A. de potencia y uno de control N.A.
- Un arrancador como el anterior, pero además con un contacto N.A. de cierre retardado (T.C. o tiempo controlado de cierre).
- Un relevador de sobrecarga.
- Una estación de botones.

+ Voltaje reducido por medio de autotransformadores:

- Un grupo de dos autotransformadores con entrehierro y provistos de derivación intermedia.
- Un relevador de control con un contacto N.C. de tiempo de apertura controlado, un contacto N.A. con el mismo tiempo de cierre al anterior, y un contacto N.A. de cierre instantáneo como mínimo.
- Dos arrancadores con 3 contactos N.A. de potencia y dos contactos N.C. de control.
- Un arrancador con dos contactos N.A. de potencia.
- Un relevador de sobrecarga.
- Una estación de botones.

+ Arranque estrella-delta. Este suele ser el más utilizado por los diseñadores dado que presenta mayor seguridad:

- Un arrancador magnético con 3 contactos N.A. de potencia, uno de control de cierre instantáneo N.A. y uno de cierre retardado.
- Un arrancador magnético con 3 contactos N.A. de potencia y uno de control N.C. instantáneo.
- Un grupo de 3 resistencias de capacidad según el motor.
- Un relevador de sobrecarga.
- Una estación de botones.
- Un grupo de dos arrancadores interbloqueados donde uno contenga 3 contactos N.A. de potencia y un N.C. instantáneo de control; el otro con 2 contactos N.A. de potencia, uno N.C. y un N.A. instantáneos de control y uno N.C.
- Es necesario que el motor presente sus 6 extremos de los devanados para poder realizar las conexiones.

+ Arranque por devanado bipartido. El problema de este método es que no es común encontrar un motor para este fin. Es necesario que esté fabricado con doble devanado y además con sus 12 extremos accesibles:

- Un arrancador magnético con 3 contactos N.A. de potencia y uno N.A. instantáneo de control.
- Un relevador con un contacto N.A. de cierre retardado.
- Un arrancador magnético con un mínimo de 5 contactos de potencia N.A.
- Cuatro relevadores de sobrecarga.
- Una estación de botones.

4.3.3 MÁQUINA SÍNCRONA.

Como se sabe, una máquina síncrona puede utilizarse tanto como motor y como generador. De una u otra forma, es necesario proporcionar un impulso inicial hasta alcanzar la velocidad de sincronización (aproximadamente del 92 al 97% de la velocidad síncrona). Debido a esto, se tiene que un motor síncrono debe tener un medio para alcanzar dicha condición; y lo más común es que posea una estructura de jaula de ardilla en el rotor. En el caso del generador, la velocidad la proporciona el primotor; sin embargo, si se tiene la jaula de ardilla es muy probable que se presenten algunas pérdidas en la generación debido a las corrientes inducidas. Esto último sería una buena práctica de laboratorio.

Otro tema que se considera importante es la compra de una máquina síncrona la cual se considera como de las más caras. A continuación el equipo adicional:

+ Como motor síncrono el arranque requiere el equipo utilizado en las máquinas de inducción según el método que se requiera emplear. Además:

- Condición de marcha: se puede hacer la sustitución del relevador de frecuencia de campo polarizado por la acción manual del que realice la práctica. Para ello se presenta el diagrama de la figura 4.1. En él el contacto M es accionado por uno de los relevadores de control de arranque, el cual es cerrado en un instante del arranque según el método aplicado. El operador deberá tener muy presente el hecho que el motor debe alcanzar el 92 al 97% de la velocidad síncrona para llevar a cabo la transición. El equipo adicional necesario es:
- Un arrancador con 2 contactos N.A. de potencia, con alimentación en C.D. con dos contactos N.A. y un N.C. de control.

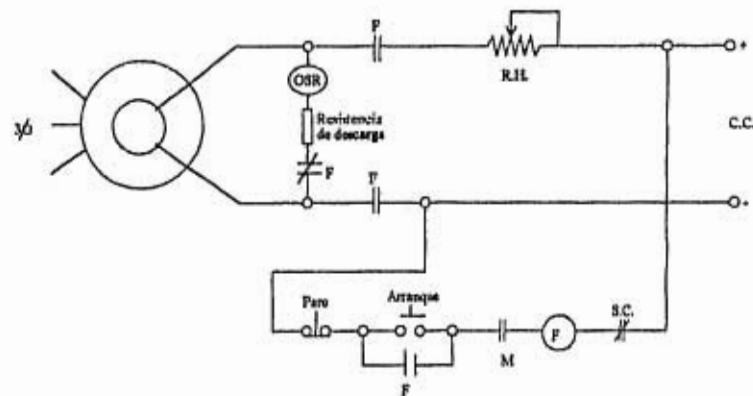


FIG. 4.1 Circuito de transición manual de arranque-marcha.

- Dos resistencias de descarga.
- Dos relevadores fuera de fase con un contacto N.C.
- Un reóstato RH de control de alimentación en C.D.
- Una fuente de C.D. de potencia con capacidad mayor a la requerida por la máquina.
- Una estación de botones.

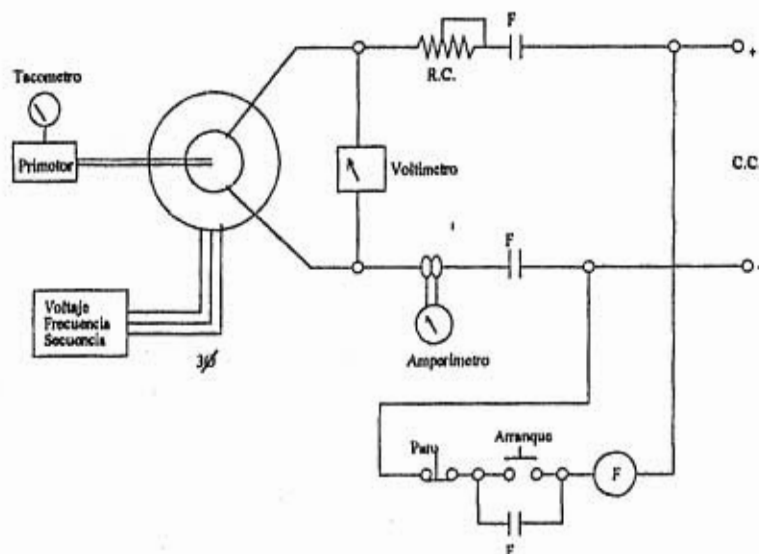


FIG. 4.2 Circuito de control de excitación de un generador síncrono.

+ Generador síncrono. Se ha hecho mención de las grandes dificultades que presenta el mantener un control estricto en todos los factores regulables de este tipo de máquinas, sin

embargo en la figura 4.2 se muestra un diagrama de un controlador básico. De él se puede apreciar que el equipo necesario lo forman:

- Una fuente de energía mecánica regulable, tal como un motor de C.D. o una máquina de combustión interna.
- Tacómetro.
- Una máquina síncrona que se adapte a la flecha del primotor y que no exceda su capacidad.
- Tres voltímetros de C.A.
- Un grupo de lámparas de prueba con capacitor, conectados en estrella para determinar la secuencia. Este sistema se expuso en la figura 3.25.
- Un frecuencímetro.
- Un amperímetro de C.D.
- Un voltímetro de C.D.
- Un reóstato de capacidad de disipación mayor a la capacidad de entrada de la máquina.
- Una fuente de potencia constante de C.D.,
- Un arrancador magnético de C.D. con 2 contactos N.A. de potencia y uno más de control.
- Una estación de botones.

Si se realizan prácticas de determinación de características de máquinas durante los pasos de arranque y marcha, se necesita además:

- Tres amperímetros de C.A.
- Wáttmetros de C.A. y de C.D.
- Un estroboscopio para determinación visual de las r.p.m.,
- Tableros de centro de carga.

4.4. PROYECTO DE TABLERO Y MESA DE MONTAJE.

4.4.1 TABLERO GENERAL.

Puesto que la idea es utilizar el mismo material de montaje para realizar el máximo número de prácticas, fue necesario tomar en cuenta la mayor cantidad de equipo a utilizarse para el montaje y control de las máquinas. De la sección anterior se observa claramente que ésta corresponde al generador síncrono, que como mínimo presentaría la necesidad de 23 posiciones en un tablero. Pensando en algunas modificaciones que se presenten útiles a dicho circuito, se acerca la cifra a 26 posiciones; con base a ello, se estima en 2 hileras de alojamiento de equipo con un claro de 20 cm. por 30 con separaciones de 5cm. lateral y 10 vertical colocadas en una mesa-tablero de 340 cm. de largo por 85 cm. de ancho y con una diferencia de elevación de 25 cm. (equivalente a un ángulo de 17°). Esto se aprecia en la figura 4.3 y 4.4.

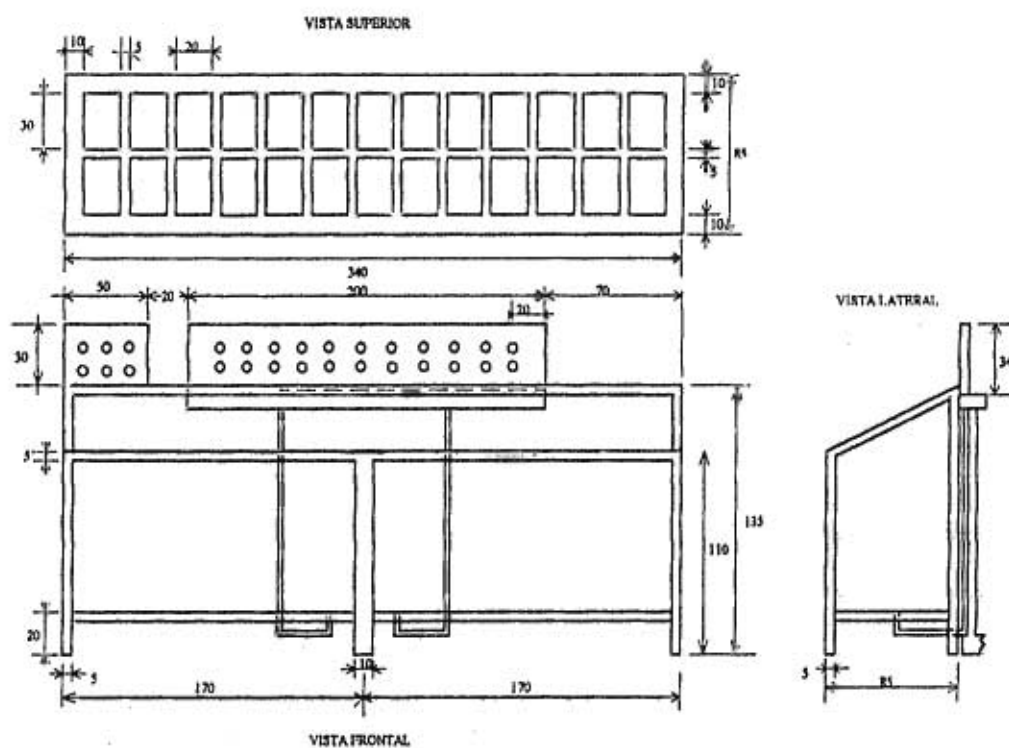


Fig. 4.3 Tablero general.

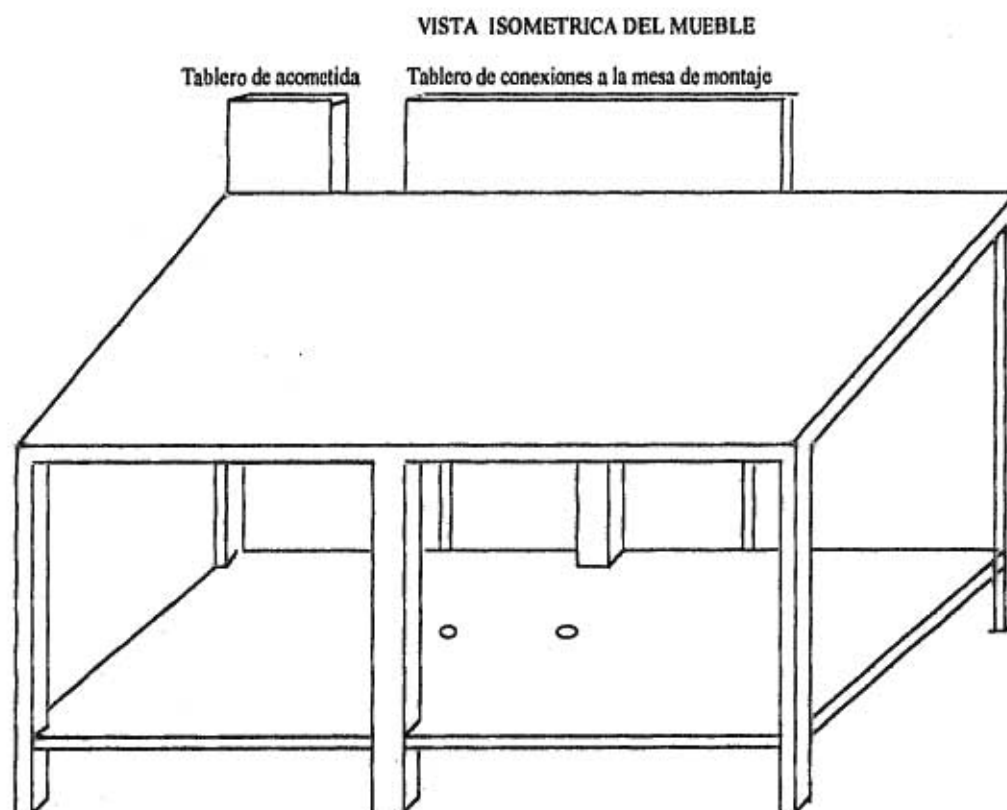


Fig. 4.4 Tablero general. Vista isométrica.

La altura total del tablero está diseñada para que el estudiante evite la necesidad de inclinarse en forma peligrosa. Además se provee de repisas en la parte inferior, las cuales podrán alojar equipo pesado tales como autotransformadores y resistencias o cualquier otro aparato que por su tamaño, no pueda permanecer en la parte superior. La conexión de este equipo a los controladores alojados en la parte superior se hará a través del pequeño tablero auxiliar llamado "Conexiones a la mesa de montaje". Además este tablero contendrá las terminales de 12 conductores calibre 4 tipo THW (cable antillama)(11).

En total el tablero contendrá 22 terminales de cable que estarán señaladas de la siguiente forma:

- 12 cables cuyas terminales tendrán letras de la "A" a la "L" y corresponderán a los 12 conductores de potencia que alimentarán a la mesa de montaje,
- 10 cables calibre 6 con numeración "I" al "X" cuyas otras terminales estarán etiquetadas de la misma forma y serán conectables a los distintos equipos antes mencionados que se colocarán en la repisa inferior.

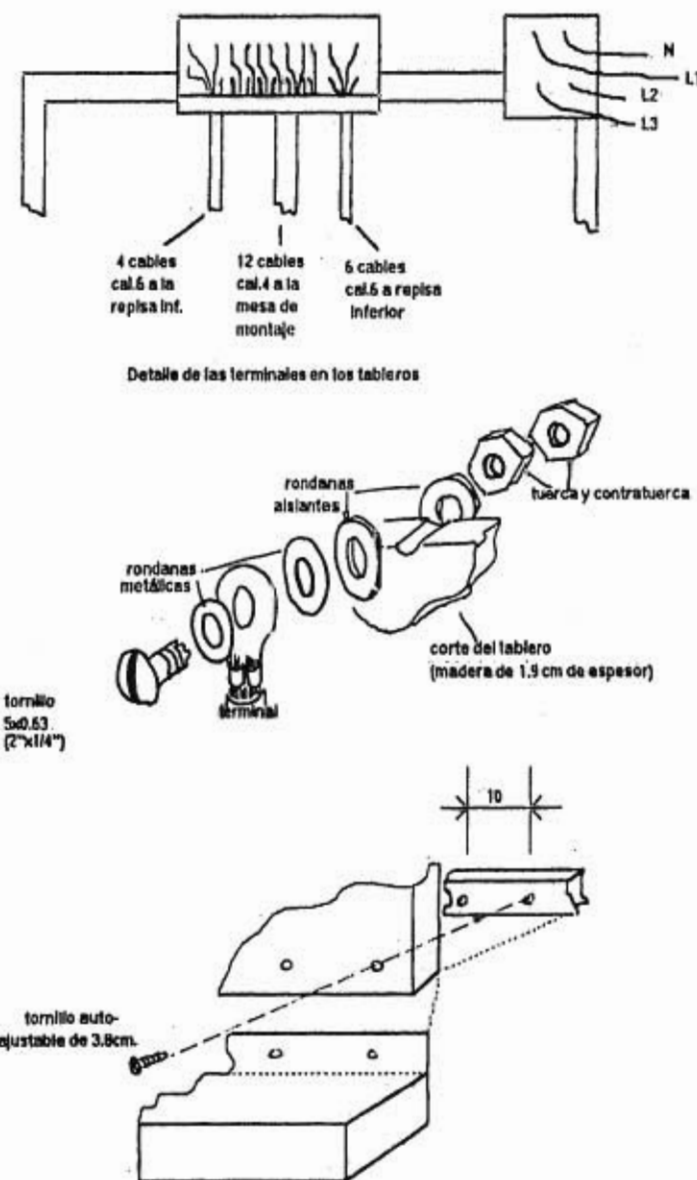
El grueso de cables que saldrán del tablero, se repartirán de la siguiente manera (ver figura 4.5):

- 6 cables calibre 6 por un tubo conduit de 38 mm. de diámetro que estarán conectando los elementos de la repisa inferior izquierda.
- 4 cables calibre 6 por un tubo conduit de 38 mm. de diámetro y cuyas segundas puntas estarán en la repisa inferior derecha.
- 12 cables calibre 4 por un ducto cuadrado de 101.6 mm. (4") que los deberá conducir hacia la mesa de montaje.

La figura 4.5 y 4.6 muestran lo anterior además de contener el alambrado del tablero de acometida, colocado a la izquierda del denominado como de conexiones. Por otro lado se pueden apreciar los detalles de sujeción de los tableros, la canaleta y el mueble y el de las terminales donde se realizará el contacto con los cables y el equipo.

Por otro lado las tablillas que contendrán los elementos de control se colocarán en los claros del tablero y por medio de unas cejas de 0.5 cm a lo largo se evitará que se caigan. Dicha medida es conveniente pues no obstruye el área útil de sujeción de equipo a las tablillas. En ellas se atornillarán los elementos de control y en los casos que sea necesario las terminales irán sobre la tablilla (como es el caso de los botones de arranque y paro, por dar un ejemplo). Las conexiones entre los elementos de control se deberán hacer con cable calibre 14

ó 16 (aunque pueden ser menores dado que no conducen grandes corrientes) y deberán tener terminales en ambos extremos.



Detalle de unión de tablero, conexiones, mueble y canaleta
Fig. 4.5 Detalle del alambrado de los tableros

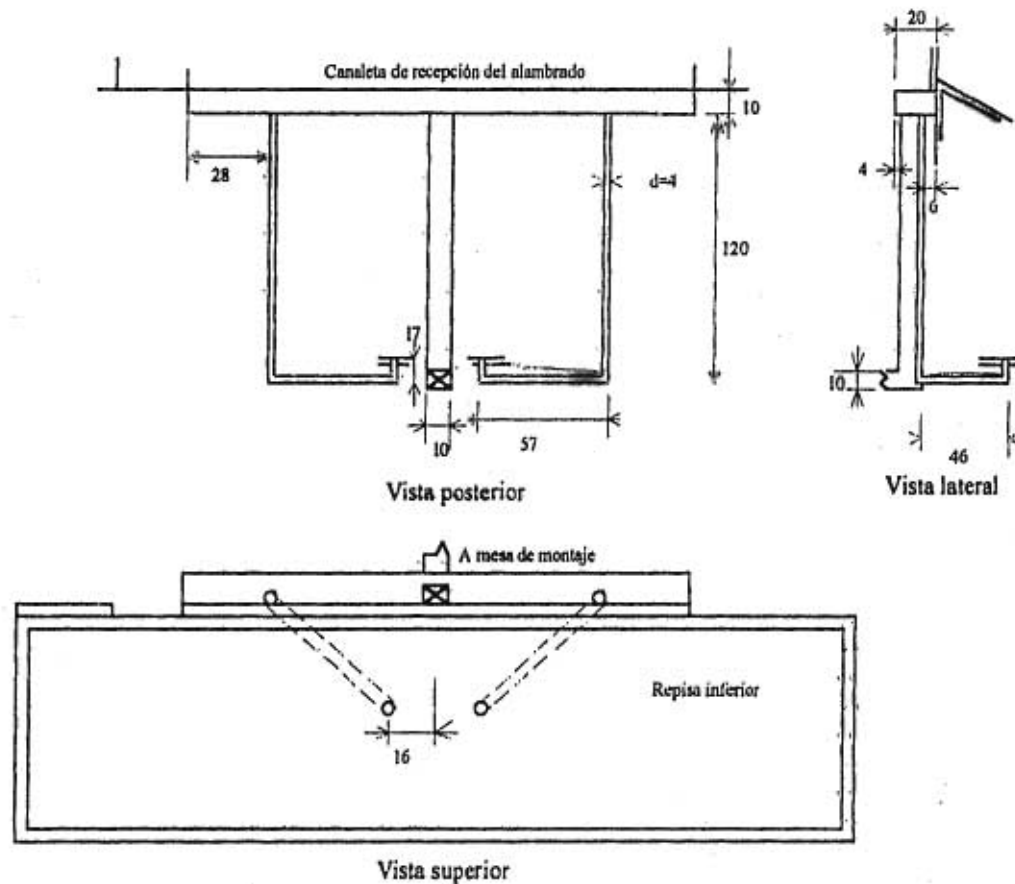


FIG. 4.6 Detalle de la acometida a repisa inferior y a mesa de montaje.

4.4.2 MESA DE MONTAJE.

Parte de la idea de este proyecto es la simulación de una situación que en la práctica profesional se pudiera presentar. El motivo de la separación entre el tablero de control y el lugar donde las máquinas se encuentran montadas, es tan común en la industria que lo contrario se considera fuera de norma. Además esta situación permite mayor seguridad a los operadores, objetivo número uno de cualquier instalación eléctrica.

Una de las limitantes que tiene este proyecto, es el espacio. El área destinada para el laboratorio de máquinas eléctricas en la Universidad Panamericana es muy reducido por lo que también será imposible realizar varias prácticas en forma simultánea; por cuestión de seguridad se recomienda que se realice sólo una con grupos máximos de 10 personas.

La mesa de montaje se proyecta con un área de 90 por 110 cm. y altura de 60 cm. del piso al área útil. Toda la estructura de la mesa deberá ser metálica y a su vez estar aterrizada eléctricamente a través de una red de tierra conectada en las 4 patas de la mesa. El aterrizaje de cualquier estructura metálica que soporte máquinas eléctricas es un requisito normalizado en el reglamento de instalaciones eléctricas. El porqué de esas dimensiones es que se ha pensado que sólo dos máquinas se montarán en forma simultánea como máximo. La altura es para evitar que se recarguen en ella y pueda ocurrir una descarga inesperada. La figura 4.7 muestra las dimensiones antes mencionadas. También incluye el acceso de los cables provenientes del tablero de control, así como el pequeño tablero de conexiones con las mismas nominaciones tenidas en el tablero de control.

La mesa tendrá unos barrenos distribuidos en la forma mostrada, y que servirán para la sujeción de las máquinas a través de 8 brazos movibles y ajustables por medio de tornillos de 7.62 cm. de largo para la mesa, y de 10.16 cm. para la máquina. Para mayor detalle observese la figura 4.8. El largo de ellos combinado con la distribución de los barrenos proporciona acceso de sujeción en casi toda el área útil de la mesa.

En lo que respecta a las terminales de potencia, se han colocado en un pequeño tablero vertical auxiliar, separadas 8 cm. cada una. La función de terminal la lleva a cabo un tornillo aislado de 1.25 cm de espesor (ver figura 4.5).

Las especificaciones del tablero vienen detalladas en la misma figura. El material de los tableros deberá ser de madera o solerón pues se necesita un material aislante. En todos los casos se deberán reforzar con un marco de metal (ángulo de 2.54 cm. de lado por 0.45 cm. de grosor). Las patas se recomienda sean de metal tubular cuadrado de 2.54 cm. de lado.

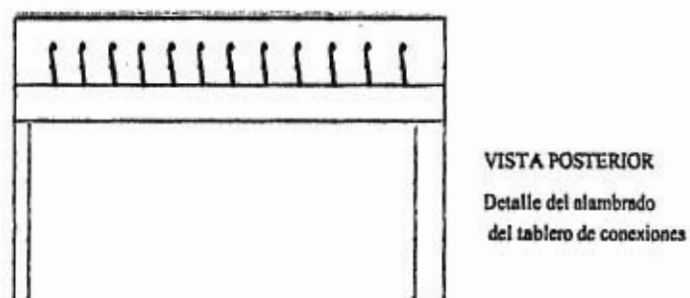
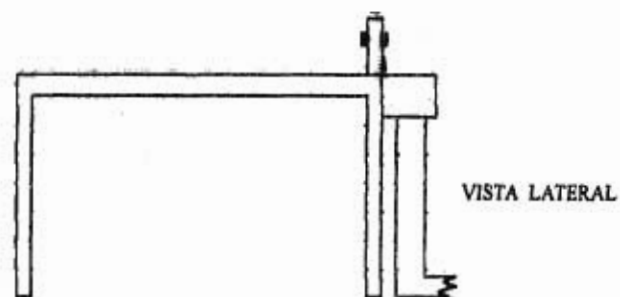
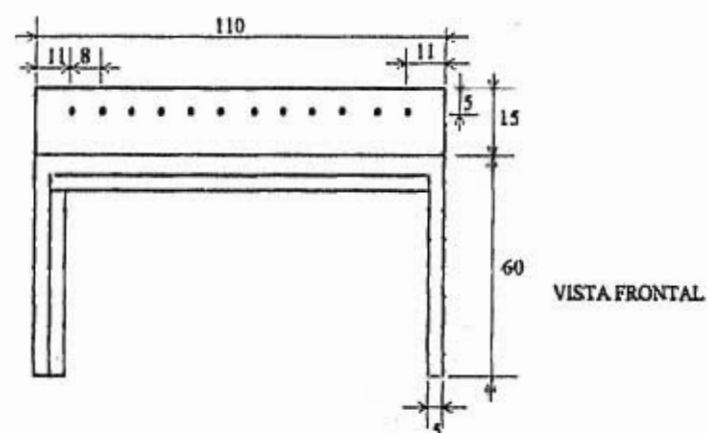


FIG 4.7 Mesa de montaje.

El montaje de las máquinas a la mesa se hará a través de los brazos de montaje y de unas gomas duras que evitarán el molesto ruido de las vibraciones.

4.5. MATERIAL Y EQUIPO.

Dentro del propósito de este anteproyecto está el que se pueda utilizar para algunas pruebas con los motores, y en alguna forma obtener las características más útiles de las máquinas. Los tipos de arranques más comunes ya se han mencionado, e incluso se señalaron algunos circuitos para realizarlos, y por medio de algunos medidores, se pueden obtener características tales como par de arranque, corriente de arranque, curvas de histéresis, pérdidas por resistencia en conductores, por fricción, corrientes con rotor bloqueado, etc.

En cuanto al equipo necesario para estas pruebas a continuación se proporciona una lista de los elementos de control mínimos indispensables para realizarlas:

- Fuente rectificadora de C.A. a C.D. con voltaje variable y controlable, y con constante; capacidad de 4000 watts.
- Estaciones de botones de uso general.
- Arrancadores magnéticos para controlar C.D. con dos contactos de potencia (5 Hp) N.A., dos contactos N.A. de control y dos N.C. de control; deberán funcionar con C.D.
- Relevadores de sobrecarga con contacto N.C. y elemento térmico con capacidad igual al motor de C.D. a usarse.
- Potenciómetro de control de C.D. (4 piezas) de 5 Hp.
- Arrancadores magnéticos de C.A. con tres contactos de potencia, tres N.A. de control y tres N.C. de control; accionables con 120 volts y 60 Hz de alimentación.
- Banco de resistencias (3) para arranques de transiciones cerradas y a tensión reducida.
- Arrancador magnético de C.A. con 5 contactos N.A. de potencia, un N.A. de control y un N.C.
- Un autotransformador de 2 devanados
- Relevadores de control de tiempo con dos contactos N.A. y dos N.C. instantáneos, y dos N.A. con dos N.C. de cierre y apertura retardados respectivamente.
- Arrancador magnético con tres contactos de potencia N.A., un contacto N.A. de cierre retardado y uno N.A. de cierre instantáneo.
- Arrancador doble interbloqueable con tres contactos de potencia N.A. cada uno, un contacto de potencia N.C., un N.C. y un N.A. de control.
- Relevadores de control.
- Relevador detector "fuera de fase" con contacto N.C.
- Amperímetros de C.A. de 0 a 100 amps.

- Amperímetros de C.D. de 0 a 100 amps.
- Voltímetros de C.A. y de C.D. de 0 a 600 volts.
- Wáttmetro de 0 a 6000 watts.
- Tacómetro de 0 a 3000 r.p.m.
- Lámparas piloto.
- Frecuencímetro de 20 a 80 Hz.
- Estroboscopio.
- Tubo conduit de 38 mm. (1.5").
- Ducto cuadrado de 101.6 mm. (4").
- Cables de diferentes longitudes calibre 16 provistos de terminales faston para uso en el control (interconectar los equipos de control).
- Perfiles angulares de 1" por 3/16" (rectos) usados como soporte de muebles, y tubular de 1" cuadrado; hojas de madera de 3/4" y lámina de 3/16" antiderrapante (para mesa de montaje).

La primera parte de la lista es equipo que tendrá gran uso pues serán las empleadas en el control. Se recomienda tener un juego de repuesto de aquéllas que en la práctica resulten más castigadas; por otra parte, la mayoría deberán tener dimensiones tales que se puedan colocar en las tablillas de montaje, por lo que será necesario tener mucho cuidado a la hora de sujetarlas.

4.5.1. SISTEMAS PRÁCTICOS DESARROLLADOS.

Considérese que se desea arrancar un motor trifásico del tipo jaula de ardilla con potencia de 1 Hp. el cual a su vez accionará a un equipo al que no afecta la puesta en marcha en cualquier momento (por ejemplo un ventilador). Si se parte que el motor es de baja capacidad, se tendrá que no es necesario un arranque a voltaje reducido. Como es del tipo jaula de ardilla, el rotor no necesita ninguna conexión al exterior.

El diagrama de conexiones utilizando partes electromecánicas se muestra en la figura 4.8. Nótese que se incluye la parte de potencia del circuito. De él se puede obtener la lista de partes necesaria:

- Una estación de botones de arranque-paro.
- Un arrancador NEMA 0 con 3 contactos de potencia N.A. y uno de control N.A.
- Un relevador de sobrecarga para proteger 2 líneas, con 2 contactos de control N.C.

Este circuito se explicó en el capítulo 3.4.1.

Para el mismo fin se puede utilizar un circuito con componentes de estado sólido, como el mostrado en la figura

4.9. En él se han hecho algunas modificaciones con respecto al mostrado en el capítulo 3.4.1. De la figura, el circuito rectificador es de media onda, con un divisor de voltaje a través de resistencia-capacitor, que proporciona 15 volts, y un diodo regulador (diodo zener). Al presionar A se alimenta una señal en la compuerta lógica OR que a su vez la procesa y da una respuesta 1 la cual se alimenta a la compuerta AND. Esta por la otra entrada tiene la señal permanente del botón B que permanece cerrado; por lo tanto, al tener señales 1 en ambas entradas, envía una señal 1 a su salida de la cual se toma la retroalimentación para OR (llamada señal de mantenimiento) para que cuando se libere A, siga existiendo la señal a su entrada y se mantenga su salida.

De la salida AND también se envía la señal a la segunda compuerta AND que hace las veces de un amplificador de señal y de un acoplador que permite pasar de un circuito de alta impedancia a uno de baja. A este arreglo se le conoce como separador Buffer y es útil para no sobrecargar el circuito de arranque-paro.

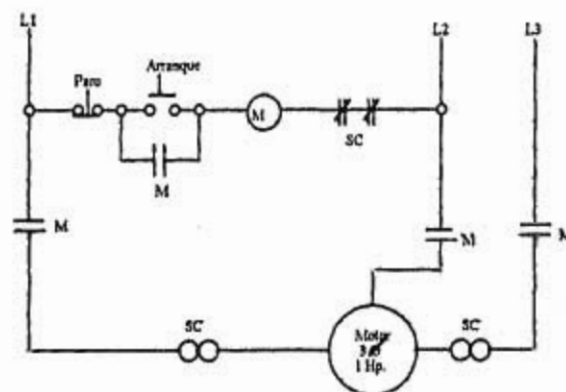


FIG. 4.8 Diagrama de conexiones de un motor trifásico a plena tensión.

Del separador Buffer se envía la señal a los diodos LED de los opto-acopladores que controlan la señal de apertura-cierre de los Triac's de potencia. Con los opto-acopladores se consigue aislar totalmente el circuito de

control con el de potencia, evitando las perturbaciones de la línea que pudieran afectar a los circuitos lógicos. El opto-acoplador es un arreglo de un triac que es puesto en posición ON a través de una señal luminosa proveniente de un diodo luminoso (LED) estando ambos en una cápsula aislada.

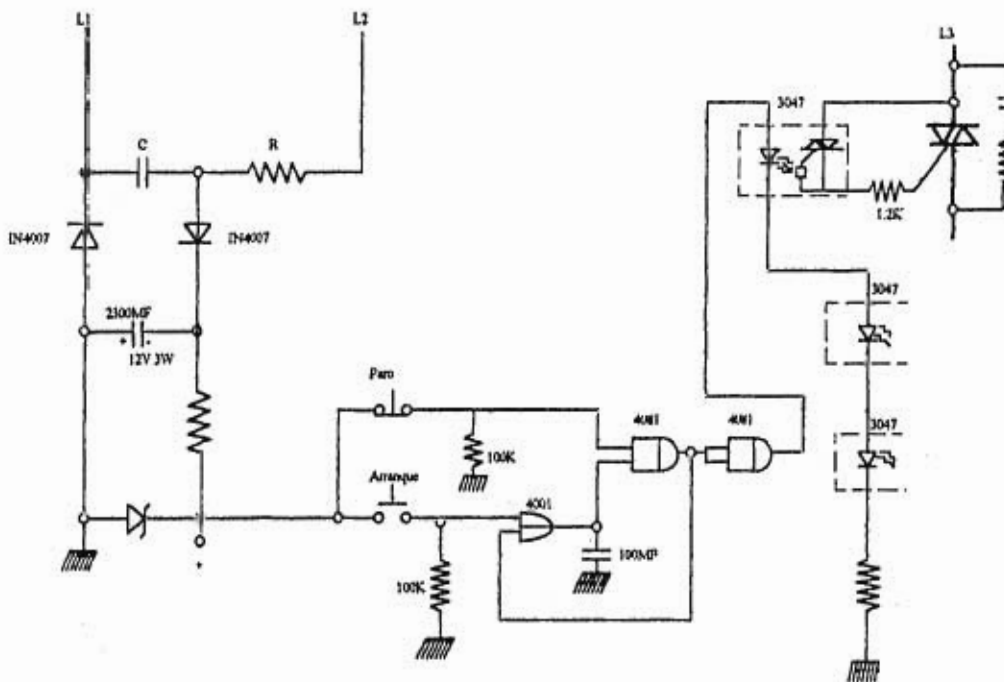


FIG. 4.9 Circuito de control de un motor trifásico con arranque a plena tensión usando componentes en estado sólido.

Para el paro del circuito, al presionar B se interrumpe la señal en una de las entradas de AND, interrumpiendo a la vez su salida. De esta forma se elimina la alimentación a los opto-acopladores los cuales se pasan a la posición OFF en el siguiente cambio de polaridad de la señal en el triac.

CONCLUSIONES.

En la actualidad el uso de las máquinas eléctricas es tan generalizado en todos los niveles de la industria, el comercio y el hogar, que se vuelve una práctica normal el utilizarlos. Sin embargo pocas veces se analiza lo que tiene detrás el botón o elemento que se acciona. Es por ello que el presente trabajo busca dar un ligero panorama de aquéllo que controla una máquina, y se concluye que:

I.- Parte del desarrollo de un control, es conocer el funcionamiento de aquéllo que se controlará y de esa forma se tendrá una mejor perspectiva de las variables a modificar y controlar los efectos que traerán consigo.

II.- Existen gran cantidad de métodos diseñados para condiciones específicas de trabajo, sin embargo la mayoría son susceptibles de modificar; es por esto que tiene gran importancia entender el modo de operar de los elementos básicos de control, sean en estado sólido o electromecánico.

III.- Es una práctica común que para aumentar la comprensión de algún concepto, método o diseño, se busca desarrollar en forma física aquéllo que se pretende reafirmar o al menos simular situaciones problema que muestren la aplicabilidad de ese concepto; en Ingeniería esto es muy importante.

IV.- Una de las necesidades con las que se enfrenta el profesionista recién egresado, es el haber tenido cierta experiencia sobre el manejo de ciertas situaciones problema. El hecho de desarrollar durante su preparación académica algún tipo de prácticas en condiciones en condiciones controladas, aunque no sustituye la práctica profesional, busca introducirlo a esa rama de su profesión y familiarizarlo con sus términos; además se busca que conozca o pueda medir los efectos de una serie de variaciones en el método de arranque, funcionamiento o paro de un motor o grupo de máquinas, para que pueda darles utilidad práctica.

V.- Es importante considerar el hecho que aunque una máquina eléctrica esté perfectamente bien construida, los mecanismos que son accionados y aun el operador del equipo, pueden tener fallas de desempeño. Esto hace necesario el diseñar los circuitos de control provistos de métodos y elementos de protección los cuales deberán evitar descomposturas en las máquinas o riesgos al operador.

VI.- Actualmente en la Universidad Panamericana el equipo y el espacio físico para el laboratorio de máquinas eléctricas en donde se puedan desarrollar prácticas está muy limitado. La idea de este trabajo es dar una pequeña contribución para la formación de un laboratorio más completo para que el estudiante pueda llevar a cabo las prácticas más importantes con las máquinas eléctricas.

B I B L I O G R A F Í A

- Nasar y L. E. Unnewer; Electromecánica y máquinas eléctricas, Edit. Limusa, México D.F., 1982.
- Kingsley, Kusko y Fitzgerald; Teoría y análisis de las máquinas eléctricas, 2a. edic., Edit. Hispano Europea, Barcelona España, 1980.
- Donald I Schilling y Charles Belove (tr. Jaime Canals Casabó); Circuitos electrónicos: discretos e integrados; Edit. Marcombo, México D.F., 1982.
- Enrique Harper, Gilberto; El ABC de las instalaciones eléctricas industriales; Preedición 1985; Edit. Limusa, México D.F., 1985.
- Walter N. Alerich; Control de motores eléctricos, teorías y aplicaciones, 7a. edición; Edit. Diana, México D.F., 1980
- Wildi Theodore y De Vito; Experimentos con equipo eléctrico; Edit. Limusa, México D.F., 1978.
- William David Cooper; Instrumentación electrónica y mediciones; Edit. Prentice-Hall Internacional; Colombia, 1982.
- Manual de prácticas para talleres y laboratorios, Ingeniería Industrial Electrónica; Secretaría de Educación Pública, Institutos Tecnológicos Regionales; Tlalnepantla, Edo. de México, 1980.
- Siemens, revista. Tomo XXXVIII, año 1970, No. 1.
- Chute and Chute; Electronics in industry; 4a. edic.; Edit. Prentice-Hall; Toronto, Can. 1980.
- Catálogo Square D; Compendio No. 18, México D.F. 1990.
- Catálogo Cutler-Hammer, México D.F. 1990.
- I. L. Koskow; Control de máquinas eléctricas; Edit. Reverté; Barcelona, Esp. 1979.
- Manual SCR de General Electric; 6ta. edic., 1979.
- Morris, N. M.; Electrónica digital para electricistas; Edit. Paraninfo; Madrid, Esp. 1982.

- Mims, Forrest M. III; Notas de electrónica, aplicaciones de circuitos integrados; Edit. McGraw Hill; México, D.F. 1988.
- Motorola, CMOS Logic Data, Serie B; U. S. A., 1988.
- NTE Technical Guide and Cross Reference, 1985/1986; U. S. A. 1985.
- Motorola, Optoelectronics Device Data; Fifth printing; U. S. A. 1989.
- National Semiconductor, CMOS Logic Databook, U. S. A. 1988.
- Motorola, Thyristor Device Data, U. S. A. 1988.
- Bergtold, Fritz; Triacs y tiristores, Circuitos prácticos de electrónica; 3a. edic.; Ediciones CEAC; Barcelona, Esp. 1987.

NOTAS ACLARATORIAS.

- 1.- Dicho parrafo fué tomado de: Cantú, Luis S., "Ley de Lenz", Electricidad y magnetismo para estudiantes de ciencia e ingeniería. Pag 196.
- 2.- Se trata del efecto inductivo debido al movimiento relativo de un campo magnético respecto a un devanado, y a la interacción entre los campos magnéticos de los devanados del estator y del rotor.
- 3.- El ángulo θ hace las veces de un posicionador espacial.
- 4.- Éste es un truco matemático que se desarrolla en: Nasar y L. E. Unnewer, Electromecánica y máquinas eléctricas. Pag 292-295.
- 5.- X_a es originada por los flujos de fuga que eslabonan sólo a los conductores de armadura, en virtud de las corrientes en ellos, no eslabonando con el devanado de campo. Se dividen en: por conexión terminal y por efecto ranura principalmente. La reactancia de reacción de armadura es atribuible a la corriente de armadura.
- 6.- La corriente i_1 alimenta la base del transistor NPN, provocándose el inicio de la corriente i_2 .
- 7.- Un incremento considerable en la carga provoca un aumento en la corriente de armadura, causando una caída de voltaje mayor en la resistencia T , y disminuyéndose a su vez el voltaje real aplicado a la armadura y por ende la velocidad decrece.
- 8.- Una explicación más amplia sobre ambas componentes se desarrolla en: Kingsley, Kusko y Fitzgerald, Teoría y análisis de las máquinas eléctricas. Pag. 369-370.
- 9.- La oleada de corriente en el arranque y la corriente de la línea en la conexión estrella, es un tercio de la corriente en conexión delta, en tanto la corriente del devanado en la conexión estrella, es 1.73 veces la de la conexión delta.
- 10.- En México los grandes proporcionan potencias de hasta 300 MVA que es el caso de los instalados en Chicoasen, Chiapas, y en Laguna Verde.
- 11.- Para la determinación se parte de la base que se utilizarán motores de 5 Hp. o menores, los cuales:

- + En C.D. consumen 20 amps. a 240 V., y 40 amps. a 120 V.
 - + En C.A. monofásica de 51 amps. a 127 V.
 - + En C.A. trifásica de 16 amps. por fase a 220 V.
- Este conductor tiene capacidad para conducir 85 amps. los que proporcionan un factor de seguridad confiable.

TABLAS DIVERSAS

Interruptores									
Desconexión	Interruptor de circuitos	Contadores con elemento térmico de sobrecarga	Contadores con elemento magnético de sobrecarga	Contadores con elemento térmico y magnético de sobrecarga	Interruptores de línea		Interruptores de pedal		
					Normalmente abierto	Normalmente cerrado	N.O.	N.C.	
Posición cerrada	Posición abierta								
Interruptores de presión y vacío		Interruptor para nivel de líquidos		Interruptor accionado por temperatura		Interruptor de flujo (aire, agua, etc.)			
N.O.	N.C.	N.O.	N.C.	N.O.	N.C.	N.O.	N.C.		
Fuente	Selector para trabajo normal		Selector para servicio pasado						
Energía o control	Dos posiciones		Dos posiciones		Tres posiciones		Interruptor de 2 posiciones		
	Tres posiciones								

MOTOR		ARRANCADOR	MÉTODO	OPERACIÓN	CLASE	OBSERVACIÓN	
TIPO	FASES						
Inducción Jaula de Ardilla	Monofásico	A plena tensión		Manual	2510	Baja Tensión	
				Magnético	8536		
	Trifásico	A plena tensión			Manual	2510	Baja tensión
					Magnético	8536	
			Comb. con desconectador en caja mold.	Magnético		8538	
					Comb. con int. magnético	8539	
					Reversible	8736	
				Magnético	8198	A.T. en aire o vacío	
			Por resistencia primaria	Magnético	8547	Baja tensión	
			Por auto- transformador	Manual	2605		
				Magnético	8606		
			Por reactor	Magnético	8924		
					8198	A.T. en aire	
			Estrella-Delta	Cambio de conex- iones de los deva- nados del motor.	Magnético	8630	Baja tensión
			Devanado bipartido			8640	
		2 velocidades	8810				
Rotor devanado	Trifásico	Control secundario	Por resistencia secundaria	Magnético	8650	Baja tensión	
Síncrono	Trifásico	A tensión plena			8198	A.T. en aire	
					8820		
		A tensión reducida	Por resistencia primaria	Magnético	8821	Baja tensión	
			autotransformad or		8822		

COMPONENTES PRINCIPALES de un arrancador:

- 1).- Contactos
- 2).- Cámaras de arqueo
- 3).- Armadura
- 4).- Núcleo
- 5).- Bobina
- 6).- Relevadores de sobrecarga

MANTENIMIENTO de un arrancador

Para mantener en buenas condiciones un arrancador es necesario revisar periódicamente (mínimo 2 veces al año) las siguientes partes:

- a) Contactos
- b) Pantallas de arqueo
- c) Bobina
- d) Contacto del núcleo magnético
- e) Limpieza general
- f) Apriete de conexiones

PARTES DE REPUESTO de un arrancador

Contactos
Resortes
Bobina
Elementos térmicos

TABLA No. 2 Editada por Square D en su catálogo. Métodos de arranque para diferentes tipos de motores.

Tipo de arrancador	Características en % de los valores a tensión plena			Ventajas	Desventajas
	Tensión del motor	Corriente de línea	Par de arranque		
Autotransformador clase 6606	80	64	64	a.- Proporciona mayor par por ampere de corriente.	a.- En potencias de bajo cabalaje su aplicación es más cara.
	65	42	42	b.- Las derivaciones en el autotransformador permiten ajustes en el arranque.	b.- Bajo factor de potencia.
	50	25	25	c.- Conveniente para períodos largos de arranque.	
Resistencia Primarias (clase 6547 ó 6549)	70	70	49	d.- Arranque con transición cerrada, corriente del motor es mayor que la corriente de línea.	
				a.- En aceleración suave la tensión del motor se incrementa con la velocidad.	a.- Eficiencia del par baja.
				b.- Alto factor de potencia durante el arranque.	b.- La resistencia libera calor.
Devanado Bipartido (CLASE 6630)	100	65	46	c.- Arranque con transición cerrada.	c.- Arranques en exceso de 5 segundos requieren resistencias muy costosas.
				d.- En potencia de bajo cabalaje su aplicación es menos cara que con autotransformador.	d.- El ajuste de la tensión de arranque es difícil para tener condiciones variables.
				e.- Posibilidad de hasta 7 puntos de aceleración.	e.- No conveniente para cargas con alta inercia, que requieren arranques muy prolongados.
Estrella Delta (clase 6630)	100	33, 1/3	33, 1/3	a.- Es el más económico de los 4 enlistados.	b.- Requieren un diseño especial del motor para tensiones mayores que 230 volts.
				b.- Arranque con transición cerrada.	
				c.- La mayoría de los motores con tensión dual pueden ser arrancados con devanado bipartido en el menor de las dos tensiones que el de resistencia primaria o autotransformador.	a.- Requiere diseño especial del motor.
				d.- Conveniente para cargas con alta inercia que requieren arranques muy prolongados.	b.- Par de arranque bajo
				e.- Eficiencia del par alta.	

TABLA DE SELECCIÓN

CARACTERÍSTICA NECESARIA	TIPO DE ARRANCADOR A USAR (Listado en orden de recomendación)	COMENTARIOS
Mínima corriente de línea	1.- Autotransformador (Clase 6606) 2.- Estrella-Delta (Clase 6630) 3.- Devanado Bipartido (Clase 6640) 4.- Resistencia Primaria (Clase 6547)	2 ó entre 3 y 4.
Aceleración suave	1.- Resistencia Primaria (Clase 6547) 2.- Estrella-Delta (Clase 6630) 3.- Autotransformador (Clase 6606) 4.- Devanado Bipartido (Clase 6640)	
Alto par de arranque	1.- Autotransformador (Clase 6606) 2.- Resistencia Primaria (Clase 6547) 3.- Devanado Bipartido (Clase 6640)	El motor de devanado bipartido no es capaz de acelerar al 100% la carga hasta que el segundo devanado es conectado.
Conveniencia por larga aceleración	1.- Autotransformador (Clase 6606) 2.- Estrella-Delta (Clase 6630) 3.- Resistencia Primaria (Clase 6547)	Para esta clasificación el arrancador de resistencia debe ser provisto con una resistencia adecuada para uso en larga aceleración.
Conveniencia por frecuentes arranques	1.- Resistencia Primaria (Clase 6547) 2.- Autotransformador (Clase 6606) 3.- Estrella-Delta (Clase 6630)	En general el motor de devanado bipartido es inadecuado para arranques frecuentes.
Para fáciles cargas de arranque	1.- Devanado Bipartido (Clase 6640) 2.- Estrella-Delta (Clase 6630) 3.- Resistencia Primaria (Clase 6547) 4.- Autotransformador (Clase 6606)	
Bajo costo	1.- Devanado Bipartido (Clase 6640) 2.- Estrella-Delta (Clase 6630) 3.- Autotransformador (Clase 6606) 4.- Resistencia Primaria (Clase 6547)	Enlistado en orden del precio del arrancador por CP.

TABLA No. 3 Editada por Square D en su catálogo. Comparación entre los distintos tipos de métodos de arranque y tabla de selección según la característica necesaria.

ARRANCADORES PARA MOTORES DE JAULA DE ARDILLA.

Los motores de jaula de ardilla pueden ser arrancados ya sea a tensión plena de línea o a tensión reducida de línea en las terminales del motor. Los autotransformadores o reactores serie son usualmente utilizados para el arranque a tensión reducida. La corriente de arranque de línea, la corriente de arranque del motor y el par de arranque dependen del método de arranque.

La siguiente table resume las diferencias:

Tipo de arrancador	Características de arranque en% de valores a plena carga.				Limitaciones	Ventajas
	Tensión al motor	Corriente de línea	Corriente del motor	Par de arranque		
Directo de la línea (tensión plena)	100	600	600	150	Toma alta corriente de línea durante el arranque lo cual afecta: 1.- CARGA: El alto par de arranque resultado de un arranque repentino al accionar la máquina puede causar esfuerzos no deseados. 2.- CAPACIDAD EN EL SISTEMA DE SUMINISTRO: Las limitaciones del sistema pueden prohibir la alta corriente de arranque cuando se arranca un motor grande a tensión plena. 3.- LOCALIZACIÓN DEL MOTOR: La caída de tensión debido a la corriente de arranque cuando el motor está localizado a una distancia considerable de la fuente de potencia, puede causar que otros arrancadores salgan de la línea.	1.-SIMPLICIDAD 2.- El menos costoso y debe ser usado cuando las limitaciones no sean aplicables.
Reactor primario	50, 65, 80	300, 390, 480	300, 390, 480	25, 42, 64	1.- Utiliza dos contactores y un reactor. De ahí que cuesta más y requiere mayor espacio que un arrancador a tensión plena. 2.-BAJO FACTOR DE POTENCIA DURANTE EL ARRANQUE.	1.- Es el arrancador a tensión reducida más económico para aplicaciones a 2400V y mayores. 2.- Esencialmente de transición cerrada (el motor no es desconectado de la línea durante la transición del arranque a tensión reducida a la marcha a tensión plena. Esto reduce los inconvenientes de transitorios por interrupciones. 3.- Las derivaciones de tensión permiten el ajuste de la tensión de arranque. 4.-ADECUADO PARA LARGOS PERÍODOS DE ARRANQUE
Autotransformador	50, 65, 80	300, 390, 480	300, 390, 480	25, 42, 64	1.-BAJO FACTOR DE POTENCIA DURANTE EL ARRANQUE 2.- Utiliza tres contactores, y un autotransformador. De ahí que cuesta más y requiere mayor espacio que el tipo reactor primario. (Necesita dos secciones verticales estándar).	1.- Provee el más alto par por ampere de corriente de línea. 2.- La corriente en el motor es mayor que la corriente de línea durante el arranque, lo cual produce el mismo par de arranque que en el arrancador con reactor primario pero con la corriente de línea reducida.

TABLA No. 4 Editada por Square D en su catálogo. Guía de selección tomando en cuenta las características de arranque.

CARACTERISTICA PREDOMINANTE	TIPO DE ARRANCADOR	BOLETIN	OBSERVACIONES
Aceleración suave	a) Estado sólido	A515	
	b) Resistencia primaria	A430	
	c) Estrella-Delta	A490	
	d) Autotransformador	A400	
	e) Embobinado dividido	A460	
Alto par de arranque	a) Estado sólido	A515	El motor de embobinado dividido no puede acelerar al 100% la carga sólo hasta que es conectado el segundo devando
	b) Autotransformador	A400	
	c) Resistencia primaria	A430	
	d) Embobinado dividido	A460	
Bajo costo	a) Embobinado dividido	A460	Colocados en orden de costo de arrancador por HP
	b) Estrella-Delta	A490	
	c) Autotransformador	A400	
	d) Resistencia primaria	A430	
	e) Estado sólido	A515	
Conveniencia por frecuente arranques	a) Estado sólido	A515	El motor de embobinado dividido no es adecuado para arranques frecuentes
	b) Resistencia primaria	A430	
	c) Autotransformador	A400	
	d) Estrella-Delta	A490	
Conveniencia por larga aceleración	a) Estado sólido	A515	El arrancador de resistencia primaria para esta característica debe ser provisto con resistencias adecuadas para larga aceleración
	b) Autotransformador	A400	
	c) Estrella-Delta	A490	
	d) Resistencia primaria	A430	
Para fáciles cargas de arranque	a) Embobinado dividido	A460	
	b) Estrella-Delta	A490	
	c) Resistencia primaria	A430	
	d) Autotransformador	A400	
	e) Estado sólido	A515	
Minima corriente de línea al arranque	a) Estado sólido	A515	Alternativas similares entre 1 y 3 ó entre 3 y 4.
	b) Autotransformador	A400	
	c) Estrella-Delta	A490	
	d) Embobinado dividido	A460	
	e) Resistencia primaria	A430	

TABLA No. 5 Editada por Cuttler-Hammer en su catálogo. Selección del tipo de arrancador según la característica predominante.

Motores trifásicos 4 polos 50/60 Hz.

INTENSIDAD MEDIA EN AMPERES A PLENA CARGA.

KW	CV	220V	380V	415V	440V	500V	660V	1000V
0.37	0.5	1.8	1.03		0.99	1	0.8	0.4
0.65	0.75	2.75	1.6		1.56	1.21	0.9	0.6
0.75	1	3.5	2	2	1.68	1.5	1.1	0.75
1.1	1.5	4.4	2.4	2.5	2.37	2	1.5	1
1.8	2	6.1	3.5	3.3	3.06	2.6	2	1.3
2.2	3	8.7	5	5	4.42	3.8	2.6	1.9
3	4	11.5	6.6	6.5	5.77	5	3.8	2.5
3.7	5	13.5	7.7	7.5	7.1	5.9	4.4	3
4	5.5	14.5	8.5	8.4	7.9	6.5	4.8	3.3
5.5	7.5	20	11.5	11	10.4	9	6.6	4.5
7.5	10	27	15.5	14	13.7	12	8.9	6
9	12	32	18.5	17	16.9	13.9	10.6	7
10	13.5	38	20			15	11.5	7.5
11	15	39	22	21	20.1	18.4	14	9
15	20	52	30	28	26.5	23	17.3	12
16.5	25	64	37	35	32.8	28.5	21.3	14.5
22	30	78	44	40	38	33	26.4	17
25	35	85	52	47	45.3	39.4	30.3	20
30	40	103	60	55	51.5	45	34.6	23
33	45	113	68	60	59	50	39	25
37	50	126	72	68	64	55	42	28
40	54	134	79	71	67	60	44	30
45	60	150	85	80	74	65	49	33
51	70	170	98	90	83	75	57	38
55	75	182	105	102	90	80	61	40
59	80	195	112	105	97	85	66	43
63	85	203	117	115	109	89	69	45
75	100	240	139	135	125	105	82	53
80	110	260	147	138	131	112	88	57
90	125	295	179	145	148	129	98	65
100	138	325	188	162	162	143	107	71
110	150	356	205	200	178	158	118	78
125	175	420	242	230	209	184	135	95
132	180	425	245	240	215	187	140	98
140	190	450	260	250	227	200	145	95
147	200	472	273	260	236	207	152	100
150	205	483	280	270	244	219	159	102
160	220	520	300	280	258	220	170	115
180	245	578	332	320	289	254	190	135
185	250	585	342	325	295	263	200	138
200	270	628	370	340	321	281	215	150
220	300	700	408	385	353	310	235	160
250	340	800	460	425	401	360	274	200
287	350	826	475	450	413	365	280	203
292	360	900	510	475	450	400	305	220
295	400	948	546	500	473	416	320	227
300	410	950	555	510	481	420	325	230
315	430	990	584	535	505	445	337	239
335	450	1100	620	550	518	472	358	250
355	480	1150	636	580	544	500	370	262
375	500	1180	670	610	575	527	395	273
400	545	1250	710	650	611	540	410	288
425	560	1339	760	690	650	574	445	302
445	600	1400	790	730	690	595	455	317
450	610	1410	800	740	690	608	460	320
475	645	1490	850	780	730	645	485	335
500	680	1570	900	820	790	680	515	350
530	720	1660	950	870	825	720	545	360
560	760	1760	1000	920	870	760	575	380
600	810	1880	1090	978	920	830	630	410
630	855	1980	1100	1020	965	850	645	425
670	910	2100	1200	1075	1020	910	690	450
710	965		1280	1140	1075	960	725	480
750	1020		1350	1240	1140	1020	770	510
800	1090		1450	1320	1200	1100	830	550
900	1220		1610	1470	1390	1220	925	610
1100	1500		1980	1810	1700	1500	1140	750

Estos valores son indicativos, varían según el tipo de motor y el constructor.

TABLA No. 6 Intensidad media a plena carga de motores trifásicos con simple jaula de ardilla.



CD4071BM/CD4071BC
Quad 2-Input OR Buffered B Series Gate
CD4081BM/CD4081BC
Quad 2-Input AND Buffered B Series Gate

General Description

These quad gates are monolithic complementary MOS (CMOS) integrated circuits constructed with N- and P-channel enhancement mode transistors. They have equal source and sink current capabilities and conform to standard B series output drive. The devices also have buffered outputs which improve transfer characteristics by providing very high gain.

All inputs protected against static discharge with diodes to V_{DD} and V_{SS} .

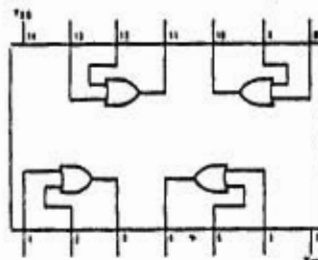
Features

- Low power TTL compatibility
- 5V-10V-15V parametric ratings
- Symmetrical output characteristics
- Maximum input leakage 1 μA at 15V over full temperature range

Fan out of 2 driving 74L or 1 driving 74LS

Connection Diagrams

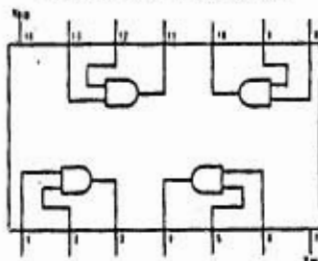
CD4071B Dual-In-Line Package



Top View

TL/P/15877-2

CD4081B Dual-In-Line Package



Top View

TL/P/15877-6

Order Number CD4071B* or CD4081B*

*Please look into Section 8, Appendix D for availability of various package types.

TABLA No.8 Diagrama de conexión del CMOS 4081. Del manual de National Semiconductor.

DC Electrical Characteristics CD4001BC, CD4011BC (Note 2)										
Symbol	Parameter	Conditions	-40°C		+25°C			+65°C		Units
			Min	Max	Min	Typ	Max	Min	Max	
I_{DD}	Quiescent Device Current	$V_{DD} = 5V, V_{IN} = V_{DD} \text{ or } V_{SS}$		1		0.004	1		7.5	μA
		$V_{DD} = 10V, V_{IN} = V_{DD} \text{ or } V_{SS}$		2		0.005	2		15	μA
		$V_{DD} = 15V, V_{IN} = V_{DD} \text{ or } V_{SS}$		4		0.006	4		30	μA
V_{OL}	Low Level Output Voltage	$V_{DD} = 5V$		0.05		0	0.05		0.05	V
		$V_{DD} = 10V$		0.05		0	0.05		0.05	V
		$V_{DD} = 15V$		0.05		0	0.05		0.05	V
V_{OH}	High Level Output Voltage	$V_{DD} = 5V$	4.95		4.95	5		4.95		V
		$V_{DD} = 10V$	9.95		9.95	10		9.95		V
		$V_{DD} = 15V$	14.95		14.95	15		14.95		V
V_{IL}	Low Level Input Voltage	$V_{DD} = 5V, V_O = 4.5V$		1.5		2	1.5		1.5	V
		$V_{DD} = 10V, V_O = 9.0V$		3.0		4	3.0		3.0	V
		$V_{DD} = 15V, V_O = 13.5V$		4.0		6	4.0		4.0	V
V_{IH}	High Level Input Voltage	$V_{DD} = 5V, V_O = 0.5V$	3.5		3.5	3		3.5		V
		$V_{DD} = 10V, V_O = 1.0V$	7.0		7.0	6		7.0		V
		$V_{DD} = 15V, V_O = 1.5V$	11.0		11.0	9		11.0		V
I_{OL}	Low Level Output Current (Note 3)	$V_{DD} = 5V, V_O = 0.4V$	0.52		0.44	0.88		0.38		mA
		$V_{DD} = 10V, V_O = 0.5V$	1.3		1.1	2.25		0.9		mA
		$V_{DD} = 15V, V_O = 1.5V$	3.6		3.0	6.6		2.4		mA
I_{OH}	High Level Output Current (Note 3)	$V_{DD} = 5V, V_O = 4.6V$	-0.52		-0.44	-0.88		-0.38		mA
		$V_{DD} = 10V, V_O = 9.5V$	-1.3		-1.1	-2.25		-0.9		mA
		$V_{DD} = 15V, V_O = 13.5V$	-3.6		-3.0	-6.6		-2.4		mA
I_{IN}	Input Current	$V_{DD} = 15V, V_{IN} = 0V$		-0.30		-10^{-5}	-0.30		-1.0	μA
		$V_{DD} = 15V, V_{IN} = 15V$		0.30		10^{-5}	0.30		1.0	μA

AC Electrical Characteristics* CD4001BC, CD4001BM					
$T_A = 25^\circ C$, Input $t_r, t_f = 20$ ns, $C_L = 50$ pF, $R_L = 200k$. Typical temperature coefficient is 0.3%/°C.					
Symbol	Parameter	Conditions	Typ	Max	Units
t_{PHL}	Propagation Delay Time, High-to-Low Level	$V_{DD} = 5V$	120	250	ns
		$V_{DD} = 10V$	50	100	ns
		$V_{DD} = 15V$	35	70	ns
t_{PLH}	Propagation Delay Time, Low-to-High Level	$V_{DD} = 5V$	110	250	ns
		$V_{DD} = 10V$	50	100	ns
		$V_{DD} = 15V$	35	70	ns
t_{THL}, t_{TLH}	Transition Time	$V_{DD} = 5V$	90	200	ns
		$V_{DD} = 10V$	50	100	ns
		$V_{DD} = 15V$	40	60	ns
C_{IN}	Average Input Capacitance	Any Input	5	7.5	pF
C_{PD}	Power Dissipation Capacity	Any Gate	14		pF

*AC Parameters are guaranteed by DC correlated testing.

Note 1: "Absolute Maximum Ratings" are those values beyond which the safety of the device cannot be guaranteed. Except for "Operating Temperature Range" they are not meant to imply that the devices should be operated at these limits. The table of "Electrical Characteristics" provides conditions for actual device operation.

Note 2: All voltages measured with respect to V_{SS} unless otherwise specified.

Note 3: I_{OL} and I_{OH} are tested one output at a time.

TABLA No.9 Datos de operación y características del CMOS 4001. Del manual de Motorola.

NTE TYPE NO.	PHOTOTHRISTORS OUTPUT CONFIGURATION	DIAG. NO.	TOTAL DEVICE RATINGS		LED RATINGS		PHOTOTHRISTOR RATINGS					
			ISOLATION VOLTAGE SURGE (V)	TOTAL POWER (mW)	MAX FORWARD CURRENT (mA)	MAX REVERSE VOLTAGE (V)	MAX BLOCKING VOLTAGE (V)	MAX GATE TRIGGER VOLTAGE (V)	MAX TURN ON CURRENT (Threshold) (mA)	MAX ON VOLTAGE AT I_T (V)	MAX HOLDING CURRENT (mA)	MAX GATE TRIGGER CURRENT (μ A)
			V_{ISO}	P_T	I_F	V_R	V_{ORM}	V_{GT}	I_{FT}	V_{ON}	I_{HOLD}	I_{GT}
3046	SCR	152b	3550	290	60	3	400	1	14	1.3 @ 100 mA	5	100
3047	Triac	152e	7500	330	50	3	250	—	15	3 @ 100 mA	100 μ A typ	—
3048	Triac	152e	7500	330	50	3	400	—	15	3 @ 100 mA	100 μ A typ	—
3049	Zero Crossing Triac Driver	152d	7500	330	50	3	250	—	15	3 @ 100 mA	100 μ A typ	—

OPTOISOLATORS PHOTOTRANSISTOR OUTPUTS

NTE TYPE NO.	OUTPUT CONFIGURATION	DIAG. NO.	TOTAL DEVICE RATINGS			LED MAX RATINGS		PHOTOTRANSISTOR RATINGS		
			ISOLATION VOLTAGE SURGE (V)	TOTAL POWER (mW)	OC CURRENT TRANSFER RATIO %	MAX FORWARD CURRENT (mA)	MAX REVERSE VOLTAGE (V)	COLLECTOR TO BASE VOLTAGE (V)	COLLECTOR TO EMITTER VOLTAGE (V)	MAX COLLECTOR CURRENT DARK (mA)
			V_{ISO}	P_T	C_{TR}	I_F	V_R	BV_{CBO}	BV_{CEO}	I_C
3040	NPN Transistor	152a	7500	250	20	80	3	70	30	100
3041	NPN Transistor	152a	7500	300	100	60	6	70	30	50
3042	NPN Transistor	152a	7500	250	20	60	3	70	30	50
3043	NPN Transistor	152a	3550	260	70	60	3	70	80	50
3044	NPN Darlington	152c	7500	250	300	80	3	—	80	1000
3045	NPN Darlington	152c	7500	250	500	80	3	—	80	1000
3081	NPN Transistor	179a	6000	250	20	60	4	—	30	100
3082	NPN Darlington	179b	6000	250	400	60	4	—	30	100
3083	NPN Darlington	152f	7500	250	200	60	3	—	30	100
3084	NPN Darlington	152f	7500	250	100	60	3	—	55	100
3086	NPN Dual Transistor	401a	7500	400	50	60	3	—	30	100

*The OC Current Transfer Ratio (C_{TR}) is the output transistor collector current divided by the LED forward current (I_C/I_F).

PHOTON COUPLED INTERRUPTER MODULE

NTE NO.	DIAG. NO.	OUTPUT TRANSISTOR CONFIGURATION	EMITTER SPECIFICATIONS			DETECTOR SPECIFICATIONS			MAXIMUM TOTAL POWER DISSIPATION mW	TYPICAL SWITCHING SPEEDS	
			MAXIMUM REVERSE BREAKDOWN Volts	MAXIMUM FORWARD CURRENT mA	FORWARD VOLTAGE DROP Volts	MAXIMUM COLLECTOR- EMITTER VOLTAGE Volts	MAXIMUM COLLECTOR CURRENT mA	MAXIMUM COLLECTOR DARK CURRENT nA		TURN-ON t_{on}	TURN-OFF t_{off}
			V_{BR}/I_R	I_F	$V_F @ I_F$	V_{CEO}	I_C	I_{CEO}		μ s	μ s
3100	399	NPN Transistor	6	60	1.7	55	100	100	250	8	50
3101	399	NPN Darlington	6	60	1.7	55	100	100	250	7	45
3102	400	NPN Transistor	6	60	1.7	55	100	100	250	8	50
3103	400	NPN Darlington	6	60	1.7	55	100	100	25	7	45

TABLA No.10 Datos técnicos de operación de los opto-aisladores. Del manual de NTE.

**NEMA 1****NEMA 4****NEMA 7-9**

NEMA 1	Usos generales	—————	Servicio interior, condiciones atmosféricas normales, construido de lámina metálica.
NEMA 2	A prueba de Goteo.	—————	Servicio interior, ofrece protección contra goteo de líquidos corrosivos, las entradas de conduit requieren de conectores especiales tipo glándula.
NEMA 3	Servicio Intemperie	—————	Servicio exterior, protección contra aire húmedo y polvo, resistente a la corrosión.
NEMA 3R	A prueba de Lluvia.	—————	Servicio exterior a prueba de lluvia, resistente a la corrosión, requiere de conectores especiales tipo glándula.
NEMA 4	A Prueba de Agua y polvo	—————	Servicio exterior, contra salpicaduras de agua y chorro directo, construcción de lámina metálica o gabinete fundido, soportes exteriores de montaje.
NEMA 5	A Prueba de Polvo	—————	Servicio interior, protección hermética contra polvo.
NEMA 7	A Prueba de Gases Explosivos	—————	Servicio interior o exterior en atmósferas peligrosas por gases explosivos, gabinete fundido atornillable o roscado, requiere de conectores especiales, soportes exteriores de montaje.
NEMA 9	A Prueba de Polvos Explosivos	—————	Servicio interior o exterior en atmósferas peligrosas, evita la entrada de polvos explosivos.
NEMA 12	Servicio Industrial	—————	Servicio interior, protección contra polvos, pelusas, fibras, goteo, salpicaduras, insectos, aceite, líquidos refrigerantes, requiere de conectores de sello, soportes exteriores de montaje.
NEMA 13	Servicio Industrial	—————	Hermético al aceite y al polvo. Servicio interior, protección contra polvos, líquidos refrigerantes y aceites.

TABLA No.11 Descripción de las aplicaciones para gabinete según clasificación NEMA.

La protección se indica por las letras IP seguidas de números indicando:

El primero, la protección contra cuerpos extraños.
El segundo, la protección

contra el ingreso de agua y si hubiera un tercero, la protección mecánica.

1er. NUMERO PROTECCION CONTRA SOLIDOS			2o. NUMERO PROTECCION CONTRA AGUA			3er. NUMERO PROTECCION MECANICA		
IP	PRUEBAS	DESCRIPCION	IP	PRUEBAS	DESCRIPCION	IP	PRUEBAS	DESCRIPCION
0		No. protección	0		No. protección	0		No. protección
1		Protección contra cuerpos sólidos mayores de 50 mm.	1		Protección contra gotas de condensación	1		Protección contra impactos de energía de 0.225 Joules
2		Protección contra cuerpos sólidos mayores de 12 mm.	2		Protección contra gotas de agua hasta 15° de la vertical	2		Protección contra impactos de energía de 0.375 Joules
3		Protección contra cuerpos sólidos mayores de 2.5 mm	3		Protección contra lluvia de hasta 60° de la vertical	3		Protección contra impactos de energía de 0.500 Joules
4		Protección contra cuerpos sólidos mayores de 1 mm.	4		Protección contra proyecciones de agua en todas direcciones	5		Protección contra impactos de energía de 2.00 Joules
5		Protección contra depósitos perjudiciales de polvo	5		Protección contra chorros de agua a presión en todas direcciones	7		Protección contra impactos de energía de 6.00 Joules
6		Protección completa contra ingreso de polvo	6		Protección contra ingreso de agua en alta mar	9		Protección contra impactos de energía de 20.0 Joules
			7		Protección contra inmersión temporal en agua			
			8		Protección contra inmersión permanente en agua			

TABLA No.12 índices de protección para equipo eléctrico expuesto a diferentes tipos de agentes ambientales (índices IEC).

