

26  
2EJ



*Universidad Nacional Autónoma  
de México*

*Facultad de Estudios Superiores  
"CUAUTITLAN"*

*MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA (C. D.)  
"CONTROL DE ARRANQUE Y VELOCIDAD"*

**T E S I S**

*Que para obtener el título de  
Ingeniero Mecánico Electricista*

*p r e s e n t a*

**LUIS VARGAS RIOS**



**V N A M**

*Director de Tesis:  
I.M.E. José Angel López Bucio*

*Cuautitlán Izcalli, Estado de México 1987*



## **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 está 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.

MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA (C. D.)

" CONTROL DE ARRANQUE Y VELOCIDAD "

I N D I C E		PAGINA
	INTRODUCCION	1
CAP.	I.- PRINCIPIO DE OPERACION Y CONSTRUCCION DEL MOTOR DE C.D.	4
	1. 1 Fundamentos del Motor	4
	1. 2 Fuerza actuante sobre un conductor recorrido por una corriente.	5
	1. 3 Regla de Fleming de la mano izquierda	7
	1. 4 Par motor	8
	1. 5 Par desarrollado por un motor	9
	1. 6 Fuerza contraelectromotriz	11
	1. 7 Potencia Interna	14
	1. 8 Velocidad del motor	15
	1. 9 Reacción de inducido y posición de las Escobillas en los Motores.	16
	1. 10 Polos de conmutación	17
	1. 11 Estructura del motor de C. D.	18
	1. 12 Formas de conectar los devanados del estator con los devanados de la armadura (máquina Auto-Excitadas)	20
	1. 13 Características que necesitan tener las máquinas auto-excitadas.	21
CAP.	II.- MOTOR DERIVADO (SHUNT)	24
	II. 1 Características de funcionamiento	24
	II. 2 Efecto de la reacción de inducido sobre la velocidad.	25
	II. 3 Regulación de la velocidad en los motores en derivación	25
	II. 4. Variación de la velocidad en los motores en derivación- mediante control de campo de excitación	26

	Pág.
II. 5. Variación de la velocidad de un motor en derivación mediante control de la resistencia del inducido.	30
II. 6 Regulación de la velocidad de un motor en derivación	32
II. 7 Comparación entre la regulación de la velocidad por control de la resistencia de inducido y por control del campo de excitación.	33
II. 8 Sistema Ward-Leonard de regulación de velocidad.	33
II. 9 Aplicación del sistema Ward-Leonard de regulación de velocidad.	35
II. 10 Acción recuperadora del sistema Ward-Leonard	36
II. 11 Empleo del volante en el sistema Ward-Leonard	36
CAP. III.- MOTOR SERIE	38
III. 1 Curvas características	38
III. 2 Par de Arranque	38
III. 3 Características de funcionamiento	39
III. 4 Regulación de la velocidad	40
CAP. IV.- MOTOR COMPUESTO (COMPOUND)	42
IV. 1. Generalidades	42
IV. 2 Motor en composición diferencial	42
IV. 3 Volante y motor compuesto	43
CAP. V.- ARRANQUE DEL MOTOR DE C.C.	44
V. 1 Arrancadores manuales de C.C.	44
A) Generalidades	44
B) Puesta en marcha y aceleración de motores de C.C.	44
C) Arrancador comercial de tres bornes	48
D) Arrancador comercial de cuatro bornes	50

	Pág.
E) Arrancadores manuales de motores serie	53
F) Regulador manual de tambor	55
V. 2 Arrancadores automáticos de C.C.	57
A) Generalidades	57
B) Arrancador de aceleración de tiempo fijo, de C.C., que utiliza <u>contactores</u> de acción retardada	58
C) Arrancador de aceleración por tiempo fijo de C.C., que utiliza relés de amortiguador	60
D) Arrancador de aceleración por tiempo fijo de C.C., que utiliza un temporizador motorizado o un mecanismo de tiempo.	62
E) Arrancador de aceleración por tiempo definido de C.C., que utiliza constante de tiempo inductiva de relés de bobina de retención	64
F) Arrancador de aceleración por limitación de la corriente de C.C., que utiliza relés de f.c.e.m. (método por limitación de la velocidad).	66
G) Arrancador de aceleración por limitación de la corriente de C.C. que utiliza relés de bobina de retención.	68
H) Arrancador de aceleración limitador de la corriente de C.C., que utiliza relés serie.	70
I) Arrancador de aceleración por limitación de la corriente de C.C., que utiliza bobinas de retención (aceleración por caída de tensión).	71
J) Arrancador de aceleración por limitación de la corriente, de C.A., que emplea bobinas de retención y <u>amplificador</u> magnético.	72
<b>CAP. VI.- CONTROL DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR DE C.D.</b>	<b>76</b>
VI. 1 Generalidades	76
VI. 2 Control de campo	76
VI. 3 Control de la resistencia de inducido	78
VI. 4 Control de la resistencia de inducido en serie y shunt	79
VI. 5 Control de la tensión de inducido	81

	Pág.
CAP. VII.- CONTROL ELECTRONICO DE MOTORES DE C.C.	84
VII. 1 Generalidades	84
VII. 2 Funcionamiento de los motores de C.C. con rectificación electrónica	95
CAP. VIII. - APLICACIONES DEL MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA (C. D.)	99
VIII. 1 Motor en derivación (SHUNT)	99
VIII. 2 Motor en serie	99
VIII. 3 Motor compuesto (COMPOUND)	100

# I N T R O D U C C I O N

## MOTOR ES LA MAQUINA QUE CONVIERTE ENERGIA ELECTRICA EN MECANICA

La máquina de C.D. es una máquina de polos salientes con los polos salientes en el estator. En estos polos van colocadas diversas bobinas de campo que pueden ser conectadas de diferentes maneras a un suministro de C.D. En general, estos polos salientes producen el campo magnético principal para la máquina, este campo es fijo en el espacio y asimismo no varía con el tiempo, excepto durante perturbaciones transitorias. El rotor es una estructura cilíndrica, en donde se alojan bobinas distribuidas en ranuras y con conexiones que se hacen desde estas bobinas a los segmentos del conmutador.

Las corrientes en las bobinas de la armadura son alternas, pero la acción rectificadora de la combinación conmutador-escobillas controla la distribución de corriente y produce un campo magnético que es constante en el espacio y en el tiempo y que está normalmente en cuadratura (90°) en el espacio, con el campo principal. Si la corriente de armadura se suministra desde una fuente externa, la máquina es un motor. La interacción entre el campo del estator y el campo del rotor produce el par motor, que hace girar la flecha y convierte energía eléctrica en energía mecánica. Si una fuente mecánica externa hace girar la flecha de la máquina, entonces es un generador; se induce una FEM en las bobinas de la armadura la que se puede usar para suministrar corriente eléctrica a través de un circuito externo, convirtiéndose así la energía mecánica en energía eléctrica.

Los tipos normales de motores y generadores de C.C., son llamados comúnmente en derivación, en serie y compuesto. Las máquinas en derivación y en serie tienen normalmente sólo un circuito equivalente de campo.

Físicamente puede haber varias bobinas idénticas colocadas en los polos salientes, pero éstas están interconectadas para formar un circuito eléctrico alimentado desde una fuente. Las máquinas en serie tienen su circuito de campo conectado en serie con la armadura, de tal manera que la corriente de la armadura pasa a través de las bobinas de campo. La máquina en derivación ha sido llamada de esta manera porque los devanados del campo están diseñados para ser conectados en derivación (paralelo) con la armadura, de tal manera que el voltaje a través de la armadura es también el voltaje a través del circuito de campo.

En muchas aplicaciones, sin embargo, el campo puede ser energizado desde una fuente separada, que suministra un voltaje constante o la armadura puede ser alimentada por una corriente constante y el campo alimentado por una fuente de suministro ajustable o variable. Normalmente las máquinas que se usan en dichas aplicaciones son máquinas en derivación, aún cuando si se desea se pueden usar máquinas en serie.

Naturalmente las bobinas en derivación por lo general están diseñadas para operar a alto voltaje y baja corriente, mientras que las bobinas en serie lo están para bajo voltaje y elevada corriente; estos factores deben ser considerados al seleccionar una máquina para condiciones especiales de operación. La máquina compuesta tiene dos juegos de bobinas de campo, uno diseñado para conexión en serie y el otro para conexión en derivación:

Con diseño y conexiones convenientes este "COMPUESTO" puede proporcionar algunas características deseables que no poseen ni las máquinas en derivación ni las máquinas en serie.

Todas estas máquinas tienen el mismo diseño de circuito de armadura, el que generalmente puede representarse como un circuito de una sola bobina. Físicamente, como es natural, la armadura real tiene muchas bobinas conectadas en serie o en paralelo. El arreglo - conmutador-escobillas cambia de manera efectiva las conexiones del circuito físico, pero en cada máquina hay siempre cuando menos dos caminos en paralelo a través de la armadura; y cada camino contiene el mismo número de bobinas, aún cuando las bobinas físicas específicas se cambien de un camino al otro a medida que la armadura gira.

En la tabla I se muestran diagramas esquemáticos típicos para motores en derivación, serie y compuesto. Pueden ser usados como guía al fijarse las ecuaciones del movimiento, las que también están tabuladas. Estas a su vez, pueden usarse para obtener las ecuaciones del estado permanente, las que también aparecen en la tabla.

La gran mayoría de las máquinas se usan en aplicaciones en que la característica importante es el funcionamiento de estado permanente. Para los motores las dos características más importantes del funcionamiento de estado permanente son la capacidad de producir el par necesario y la capacidad de mantener (o cambiar) la velocidad cuando la carga varía. Estas características son un tanto distintas en las máquinas en derivación, serie o compuesto, como muestra en las curvas de funcionamiento de la tabla I. Muy a menudo estas curvas proporcionan la suficiente información como para permitir una selección inteligente del tipo de máquina requerido para una aplicación dada. Sin embargo, una práctica muy conveniente que por lo común deben seguir los ingenieros, requiere de un entendimiento básico de las razones por las cuales una determinada máquina tiene ciertas características específicas; este aspecto se trata en forma matemática en un capítulo posterior.

Aún cuando casi todas las aplicaciones de las máquinas tienen requisitos definitivos de estado permanente, un número cada vez mayor de aplicaciones da un gran énfasis al funcionamiento dinámico (transitorio), de tal manera que se requieren también técnicas matemáticas y experimentales, para investigar las características dinámicas.

A menudo sucede que una máquina con características excelentes de estado permanente no puede usarse debido a su operación dinámica poco satisfactoria, o viceversa. Esto ha conducido al diseño de muchos tipos nuevos de máquinas e indudablemente conducirá a mayores desarrollos posteriores.

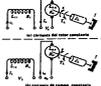
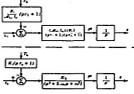
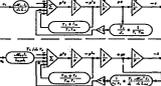
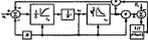
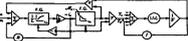
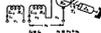
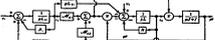
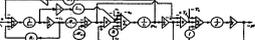
Desde el punto de vista del análisis, tanto las características de estado permanente como las de funcionamiento dinámico están incluidas de manera teórica en las ecuaciones diferenciales del movimiento, cuya lista también aparece en la tabla I.

Además de las máquinas en derivación, serie o compuestas existe un buen número de otras que tienen nombres especiales y características de operación especiales. Físicamente éstas sólo difieren muy poco de las máquinas normales. Por lo general, tienen un cierto número de bobinas en los polos del campo. Estas bobinas están interconectadas y operan de manera especial. Algunas de estas máquinas pueden tener escobillas adicionales en el conmutador que están conectadas a una o más de las bobinas de campo. Las ecuaciones de estas máquinas se obtienen y analizan exactamente con las mismas técnicas usadas para las máquinas normales.

La característica que tiene el motor de corriente continua de poder cambiar su velocidad desde un rango de cero hasta su velocidad nominal e incluso arriba de esta, es lo que lo ha hecho muy útil en trabajos en donde la carga varía constantemente, además del gran par de arranque que se puede lograr con este motor (hasta cuatro veces el par normal), con una intensidad de arranque aceptable.

Los avances técnicos logrados en las últimas décadas, en cuanto a electrónica se refiere, han hecho posible que los controles de arranque y velocidad de los motores de corriente continua se hayan simplificado en cuanto a su operación y costo e incrementando su precisión de trabajo y por lo tanto su campo de acción en la industria, como por ejemplo:

- a) Aparatos de elevación.
- b) Gruas.
- c) Laminadores.
- d) Transportadores por cable.
- e) Molinos.
- f) Cizallas.
- g) Compresores.
- h) Máquina para papel.
- i) Ventiladores.
- J) Etcetera.

Tipo de máquina	Diagrama representativo	Características de estado permanente	Relaciones de estado permanente	Ecuaciones diferenciales del movimiento	Modelo matemático (forma de diagrama de bloque <sup>1</sup> )	Diagramas de bloque para computadoras analógicas	Funciones de transferencia
Motor con excitación independiente			<p><b>MOTOR</b></p> $T_e = T_r = \alpha_m i_a i_f$ $E_b = \alpha_m i_a \omega$ $E_a = E_b - I_a R_a$ $I_f = E_f / R_f$ <p>Habilidad de velocidad (símbolo = SR)</p> $SR = \frac{E_f}{I_a R_a}$	$\dot{I}_a = \frac{1}{L_a} (U_a - E_b - I_a R_a)$ $J \dot{\omega} + b \omega = T_e - T_r$ $T_e = \alpha_m i_a i_f$ $i_f = I_f (1 - \tau_f \dot{I}_f)$ $i_f = (R_f + p L_f) i_f + \alpha_m i_a \omega$			$\frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{\alpha_m I_f}{R_a} \times \frac{1}{(s\tau_a + 1)(s\tau_f + 1)}$ $\frac{\Omega(s)}{I_a(s)} = \frac{R_f}{R_a(p + 1/\tau_f) + \alpha_m}$
Motor serie			<p>SR no se define para los motores serie</p> $T_e = E_b I_a = T_r I_a$ $E_b = \alpha_m I_a \omega$ $I_a = I_f = I$ <p>En donde <math>R_{eq}</math> es potencia perdida por rotación (2)</p> $i = I_a R_{eq} (I_a)$ <p>Nota: <math>T_r</math> incluye el par del motor correspondiente a las pérdidas por rotación.</p>	$J \dot{\omega} + b \omega = T_e - T_r$ $T_e = \alpha_m I_a^2 = \alpha_m I^2$ $i = (R_a + p L_a) I + \alpha_m I_a \omega$ <p>donde <math>R_a = R_f + R_a</math></p> $L = L_a + L_f$			<p>No existe debido a las no linealidades tanto tipo producto, como cuadráticas</p>
Motor compuesto			<p>En donde <math>R_{eq}</math> es potencia perdida por rotación (2)</p> $i = I_a R_{eq} (I_a)$ <p>Nota: <math>T_r</math> incluye el par del motor correspondiente a las pérdidas por rotación.</p>	$J \dot{\omega} + b \omega = T_e - T_r$ $T_e = \alpha_m (I_a I_f + \alpha_m I_a^2)$ $i = (R_a + p L_a) I + p L_f I_f + p L_a I_a$ $R = R_a + R_f \quad L = L_a + L_f$			<p>Misma que para los motores serie</p>

Nota:  
 1.- El tipo de saturación, como se muestra, continúa a soluciones aproximadas, las que tienen una exactitud suficiente para la mayoría de las situaciones.  
 2.- Generalmente se implica que los modelos, cuando son lineales, están linealizados en el punto de operación.

3.- El factor de saturación se representa simbólicamente por  $\frac{1}{1 - \tau_f \dot{I}_f}$  y en la relación entre el valor saturado y el no saturado de la inductancia. El factor de saturación inverso se representa por  $\frac{1}{1 + \tau_f \dot{I}_f}$  y es el reflejo del factor de saturación. Cuando se usan, los valores de la inductancia son los de la condición no saturada.

Tabla —1. Resumen de características de máquinas de C. C.

CAP. I.- PRINCIPIOS DE OPERACION Y CONSTRUCCION  
DEL MOTOR DE C.D.

I.1 FUNDAMENTOS DEL MOTOR.

La fig. 1.1 (a) muestra un campo magnético de intensidad uniforme, en el cual se halla un conductor por el que no circula ninguna corriente. En (b) aparece el conductor llevando una corriente hacia el papel, pero se ha suprimido el campo debido a los polos N y S. Al rededor del conductor aparece un campo magnético circular creado por la corriente que lo recorre. El sentido de este campo es, según la regla del sacacorchos, el de las agujas del reloj.

En la fig. 1.1 (c) se ve el campo resultante de la superposición del campo principal y el creado por la corriente del conductor.

Los dos campos tienen el mismo sentido en la parte superior del conductor pero son opuestos en la inferior. El resultado ha sido el aumento de la densidad de flujo en la parte superior y la disminución de la misma en la inferior. Se encuentra que actúa una fuerza  $F$  sobre el conductor, que tiende a moverlo hacia abajo, según indica la flecha en (c).

Es conveniente considerar este efecto como debido al mayor número de líneas de flujo existentes a un lado del conductor. Las líneas de fuerza se pueden considerar como tiras elásticas sometidas a una tensión, y estas líneas siempre tienen tendencia a contraerse y tener longitud mínima. La tensión de estas líneas en la parte superior del conductor tienden a moverlo hacia abajo, como se ve en (c)

Si se invierte el sentido de la corriente en el conductor hay un aumento de líneas de fuerza, debajo de éste, que tiende a moverlo hacia arriba, como se indica en la fig. 1.1 (d).

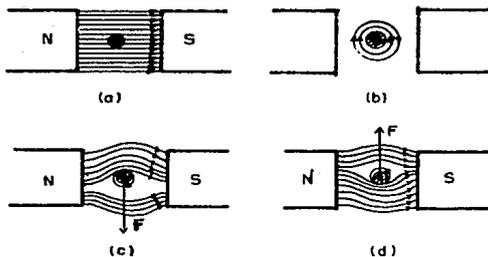


Fig. 1. 1 Fuerza que actúa sobre un conductor recorrido por una corriente y situado en un campo magnético.

El funcionamiento del motor eléctrico está basado en el principio de que un conductor recorrido por una corriente en un campo magnético tiende a moverse perpendicularmente a la dirección del campo.

## 1.2 Fuerza actuante sobre un conductor recorrido por una corriente

La fuerza que actúa sobre un conductor recorrido por una corriente en un campo magnético es directamente proporcional a la intensidad del campo, a la intensidad de la corriente y a la longitud del conductor.

$$F = \frac{B L I}{10} \quad \text{dinas} \quad - - - - 1.1$$

donde B es la densidad de flujo en gauss o en maxwell por centímetro cuadrado, L es la longitud activa del conductor en centímetros e I es la corriente en amperios. Las direcciones del campo, del conductor y de la fuerza son perpendiculares entre sí.

En unidades MKS, la fuerza resulta:

$$F = B L I \quad \text{newtons} \quad - - - - 1.2$$

Estando B en weber por metro cuadrado, L en metro e I en amperios - - (1 newton =  $10^5$  dinas).

Ejemplo.- Una bobina rectangular plana con 20 espiras está situada en un plano paralelo al campo magnético (véase fig. 1.2 (a) ) y la densidad de flujo es de 3 000 gauss.

La longitud del lado de la bobina perpendicular al campo es de 8 pulgadas (20.32 cm.). La corriente por conductor es de 30 amperios. Determinar la fuerza en kilogramos que actúa sobre cada lado de la bobina (véase las flechas de la fig. 1.2 (a) ).

$$\begin{aligned} B &= 3\,000 \text{ gauss} \\ L &= 20.32 \text{ cm.} \\ I &= 30 \text{ amperios} \end{aligned} \quad F_1 = 3\,000 \times 20.32 \times \frac{30}{10} = 182\,400 \text{ dinas.}$$

como hay 20 espiras:

$$F = 20 \times 182\,400 = 3\,658\,000 \text{ dinas}$$

$$\frac{3\,658\,000}{981} = 3\,730 \text{ gramos} = 3.73 \text{ Kg. resp.}$$

En unidades M K S :

$$\begin{aligned} B &= 0.30 \text{ Weber/M}^2 \\ L &= 0.2032 \text{ M} \end{aligned}$$

Por lo tanto:

$$F = 0.30 \times 0.2032 \times 30 \times 20 = \underline{\underline{36.58 \text{ newtons resp.}}}$$

Lo que resulta idéntico a las 3658000 dinas.

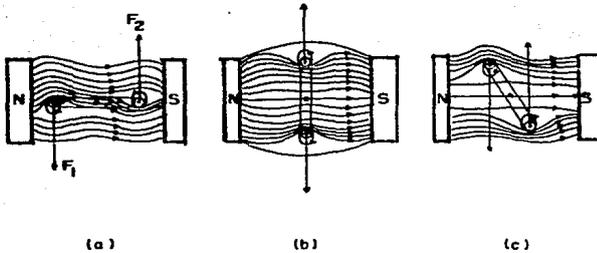


Fig. 1.2 Par desarrollado en distintas posiciones de la bobina.

Si representamos por  $B$  la densidad media de flujo radial para el radio medio  $r$  al que se hallan colocados los conductores, y si  $Z$  designa el número total de conductores del inducido, el par electromagnético " $T$ " viene dado por:

$$T = Z F r = Z \frac{B L I r}{F} \text{ Newton} - M$$

Es más cómodo expresar el par electromagnético en función de la intensidad  $i_a$  de la corriente total que circula por el inducido, y también en función del flujo total  $\phi$  por polo, en vez de utilizar la densidad media de flujo  $B$ . Ahora bien:

$$i = \frac{i_a}{\text{trayectorias}} \quad \text{y} \quad B = \frac{\phi}{A}$$

Siendo  $A$  el área de la sección de la trayectoria de flujo para el radio  $r$ . También.

$$A = \frac{2 \pi r L}{\text{polos}}$$

y, por consiguiente,

$$\begin{aligned} T &= \frac{Z \phi L i_a r}{2 \pi r L} \times \frac{\text{Polos}}{\text{trayectorias}} \\ &= \frac{Z \phi i_a}{2 \pi} \times \frac{\text{Polos}}{\text{trayectorias}} \quad \text{Newtons} - M ; \end{aligned}$$

osea,

$$T = K_t \phi \quad \text{la} \quad \text{---} \quad \text{1.3}$$

Siendo  $K_t$  una constante para cada máquina. Las ecuaciones anteriores se aplican a todas las máquinas de corriente continua, sean generadores o motores.

### 1.3 Regla de Fleming de la mano izquierda.

La relación entre el sentido del campo magnético, el del movimiento de un conductor en este campo y el de la f. e. m. inducida viene dada por la regla de Fleming de la mano derecha.

De manera análoga, la relación entre el sentido de un campo magnético, el de la corriente de un conductor en este campo y el de la fuerza resultante que actúa sobre este conductor está dada por la regla Fleming de la mano izquierda, que es como sigue:

Colocando el dedo índice en el sentido del campo o flujo y el dedo medio en el sentido de la corriente del conductor, el pulgar queda dirigido en el sentido en que el conductor tiende a moverse.

Esto viene indicado en la figura 1.3. Si se aplica la regla de Fleming de la mano derecha (para el funcionamiento de un generador) a la figura 1.3 se ve que el sentido en que debe moverse el conductor para que en él se induzca la f.e.m. y corriente indicadas en la figura es hacia abajo, o sea opuesto al del motor.

Por lo tanto, en los generadores, el conductor se mueve contra una fuerza que se opone a su movimiento, y necesita una fuerza de arrastre para mantenerse en él. Esta fuerza la suministra la máquina que arrastra el generador.

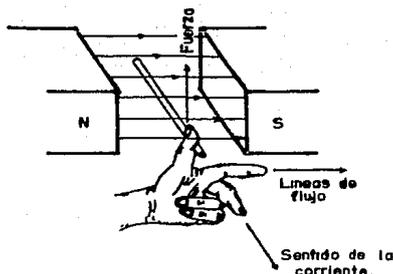


Fig. 1.3 Regla de Fleming de la mano izquierda

Se observará que la fuerza que se opone al movimiento del conductor en un generador está de acuerdo con la Ley de la conservación de la energía. La energía eléctrica suministrada por el generador es a expensas de la energía de la máquina que lo arrastra venciendo esta fuerza.

Así, en todo generador existe un efecto motriz. Se verá, más tarde, que en todo motor existe un efecto generador.

#### 1. 4. P A R M O T O R

Cuando un inducido, un volante o cualquier dispositivo similar gira alrededor de un eje se necesita una fuerza tangencial para mantenerlo en movimiento de rotación.

Esta fuerza se puede desarrollar dentro de la misma máquina, como en un motor eléctrico o máquina de varpo, o puede aplicarse a un dispositivo transmisor tal como una polea, eje, generador o engranaje de transmisión de las ruedas de un vehículo (fig. 1. 4) . El efecto total de la fuerza no queda determinado solamente por su magnitud, si no también por su brazo o distancia del eje de rotación al punto de aplicación de la fuerza. El producto de la fuerza por su distancia al eje de rotación mide el llamado PAR MOTOR.

El par tiende a producir un momento de rotación, y se expresa en unidades de fuerza por longitud. En el sistema inglés se expresa generalmente en pies-libra (a distinguir de la libra-pie, que representa trabajo).

En el sistema C.G.S. la unidad de par motor es la centímetro-dina (una unidad muy pequeña), y en el sistema métrico, la unidad es el metro-kilogramo, o más corrientemente, el kilogrametro, que es propiamente la unidad de trabajo. Un kilogrametro, es igual a 7.23 libra-pie.

En la fig. 1.4(a) la rama conductora de la correa tira del borde inferior de la polea con una fuerza tangencial  $F_2$ . La rama conducida está tirando del borde superior con una fuerza tangencial  $F_1$ . La fuerza resultante tangencial que actúa sobre el borde es  $F_2 - F_1$ .

El radio de la polea es  $r$  y, por lo tanto, el par aplicado a ésta es  $(F_2 - F_1) r$ .

La fig. 1.4 (b) muestra un engranaje compuesto de una rueda conductora de diámetro  $r_1$  en su circunferencia primitiva, y de una rueda conducida de radio  $r_2$ . Despreciando rozamientos, el par de la rueda conductora es el producto de la fuerza tangencial  $F$  por el radio  $r_1$  o sea  $F r_1$ . El Par útil en la rueda conducida o en el árbol es  $F r_2$ . Como que  $F$  es el mismo en los dos casos y  $r_2$  mayor que  $r_1$ , el par de la rueda conducida resulta mayor que el de la conductora. Las velocidades angulares de los dos ejes son inversamente proporcionales a los radios de las ruedas, y, por lo tanto, a sus pares. Además, si se desprecia la fricción, la potencia es la misma en los dos casos, -

como se desprende de la Ley de conservación de la energía.

Ejemplo. Una correa arrastra a una polea de 36 pulgadas - - (91.4 cm.) (fig. 1.4 (a) ). La tensión del lado tirante de la correa es de 90 libras (40.81 Kg.) y en el lado flojo de 30 Libras (13.60 - Kg.). Determinar el par aplicado a la polea: (a) en libras-pie: (b) en kilogrametros. a) como los dos lados de la correa actúan en oposición, la fuerza tangencial resultante en el borde de la misma es de - 90 - 30 = 60 Libras. Esta fuerza actúa a una distancia de 18 pulgadas (45.72 cm ó 1.5 pies) del eje de rotación.

Por lo tanto, el par es:

$$T = 60 \times 1.5 = \underline{90 \text{ libras-pie Resp.}}$$

b) La fuerza es de 40.81 - 13.60 = 27.21 Kg.

$$T = 27.21 \times 0.4572 = \underline{12.44 \text{ Kgm. Resp.}}$$

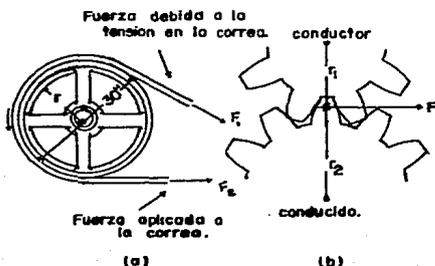


Fig. 1.4 Par desarrollado por una correa y por un engranaje.

### 1. 5 Par desarrollado por un motor.

La fig. 1.2 (a) muestra una bobina de una sola espira, cuyo plano es paralelo al campo magnético. Por el lado izquierdo de la espira la corriente entra en el papel, y por el lado derecho sale de él. Por lo tanto, el conductor de la izquierda se encuentra sometido a una fuerza  $F_1$ , que tiende a desplazarlo hacia abajo, y el conductor de la derecha se encuentra sometido a una fuerza  $F_2$ , que tiende a desplazarlo hacia arriba.

Como sea que la corriente en cada uno de los conductores es la misma y ambas se encuentran en el mismo campo magnético, la fuerza  $F_1$  es igual a la  $F_2$ , y estas dos fuerzas dan lugar a un par que tiende a hacer girar a la espira alrededor de su eje en sentido contrario a las agujas del reloj. En (a) la espira se encuentra en la posición para la cual el par es máximo y por que la distancia entre el eje de

la espira y las líneas de acción de  $F_1$  y  $F_2$  es máxima.

Cuando la espira alcanza la posición (b), ninguno de los conductores puede desplazarse, a menos que la espira sufra una deformación. Esta es una posición de par nulo, porque la distancia del eje de la espira a la línea de acción de las fuerzas es cero.

Sin embargo, si la dirección de la corriente en la espira se invierte cuando alcanza la posición (b), y la espira se desplaza ligeramente más allá del punto muerto, como se ve en (c), aparece un par que sigue haciendo girar a la espira en sentido contrario a las agujas del reloj.

Para desarrollar un par continuo en el motor, la corriente en cada espira se debe invertir cuando pasa por la zona neutra o zona de par nulo. Por lo tanto, se necesita de un colector. Esto es análogo al uso del colector en las máquinas para que la corriente suministrada al circuito externo sea unidireccional.

Un motor con una sola espira, como el de la fig. 1.2, es imposible de realizar, pues aparecen puntos muertos y el par desarrollado no actúa siempre en el mismo sentido. Un inducido de dos espiras eliminaría los puntos muertos, pero el par desarrollado adolecerá del mismo inconveniente.

Los mejores resultados se obtienen con un inducido de gran número de espiras, análogamente al inducido de una máquina. De hecho no existe ninguna diferencia en la realización práctica de un inducido de motor y un inducido de generador. En la figura 1.5, se ilustra el inducido y el campo de un motor bipolar, y la fuerza que actúa sobre cada conductor viene indicada por una flecha.

En cada instante sólo un pequeño número de las espiras del inducido se encuentra en conmutación. Por ello la variación en el número de conductores activos es tan pequeña que el par desarrollado es prácticamente constante, en el supuesto de que la corriente en el inducido y su flujo sean constantes.

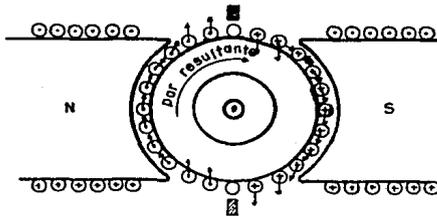


Fig. 1.5 Par motor desarrollado por los conductores del inducido de un motor.

Según las formulas (1.1) ó (1.2), en un dinamo cualquiera el flujo por polo es proporcional a la inducción media B, siendo el radio del inducido y la longitud L activa de conductor del mismo, constantes de la dinamo. De aquí que el par desarrollado por el inducido es:

$$T = K_t I \Phi \text{ --- 1.3}$$

en donde  $K_t$  es una constante de proporcionalidad que depende de las dimensiones del inducido, del número de espiras, del sistema de unidades, etc., I es la corriente en el inducido expresada en amperios, y  $\Phi$  es el flujo que penetra en el inducido desde un polo norte.

Es decir, que, en un motor, se verifica que el par motor es proporcional a la corriente del inducido y a la intensidad del campo magnético.

Conviene recordar esta relación pues, con ayuda de ella, la variación del par con la carga en los diversos tipos de motores se puede determinar con facilidad.

Ejemplo.- Cuando el inducido de un motor consume 50 amperios de la línea, desarrolla un par de 8 30 Kgm. Si la intensidad de campo se reduce al 75% de su valor primitivo, la corriente aumenta a 80 amperios. ¿Cuál es el par desarrollado?.

Si la corriente del inducido permaneciese igual a su valor primitivo de 50 amperios, el valor del par debido solamente a la disminución del campo sería  $0.75 \times 8,30 = 6,23$  Kgm. Debido al aumento de la corriente, el valor definitivo del par será  $(80/50) 6,32 = 9,96$  Kgm.

Se debe recordar que el par expresado por estas fórmulas es el desarrollado por el inducido o par electromagnético.

El par útil en la polea será ligeramente inferior a éste, debido al perdido en compensar los rozamientos y las pérdidas en el hierro del inducido.

## 1. 6. FUERZA CONTRAELECTROMOTRIZ.

La resistencia del inducido de un motor corriente de 10 caballos ingleses y 230 voltios es aproximadamente de 0.25 ohms.

Si este inducido estuviera conectado directamente a una red de 110 voltios, la corriente, según la ley de ohm, será:  $I = 230/0.25 = 920$  amperios. Este valor de la corriente no solamente es excesivo, sino también totalmente anormal, especialmente si se tiene en cuenta que la corriente nominal de un motor de este tipo es de unos 38 amperios. Cuando un motor está funcionando, es evidente que la corriente del inducido no está determinada solamente por su resistencia óhmica.

Los conductores, además de llevar corriente y desarrollar así un par motor, están cortando un flujo y generan una F.E.M.

La fig. (1.6) muestra un conductor aislado del inducido de un motor en el instante en que pasa por delante de un polo norte. Este conductor se puede mover libremente.

La flecha del lado izquierdo señala el sentido de la tensión aplicada y, por tanto, el de la corriente. Si se aplica la regla de Fleming de la mano izquierda se ve que la relación entre la dirección de la corriente y el flujo es tal que el conductor tiende a moverse - hacia abajo por la acción de la fuerza aparecida.

Al moverse el conductor hacia abajo corta flujo, y en el conductor se genera una F.E.M. Si se aplica la regla de la mano derecha para determinar el sentido de esta F.E.M. inducida, se encuentra que actúa de derecha a izquierda (fig. 1.6) y está en oposición con la - tensión y la corriente aplicada. Por esto a tal F.E.M., inducida se le llama fuerza contraelectromotriz. Esta F.C.E.M., se opone al paso de la corriente por el inducido.

Puesto que la F.C.E.M., se opone a la tensión de la línea, la tensión resultante que actúa en el circuito del inducido es la diferencia entre la línea y la F.C.E.M.

Sea  $V$  la tensión de línea y la  $E$  la f.c.e.m. la tensión resultante que actúa en el circuito del inducido será  $V-E$  voltios y la corriente del inducido, según la Ley de ohm:

$$I_a = \frac{V - E}{R_a} \text{ amperios} \quad \text{--- 1.4}$$

donde  $R_a$  es la resistencia del inducido o armadura.

Esta expresión también se puede escribir:

$$E = V - I_a R_a \quad \text{Voltios} \quad \text{--- 1.5}$$

$$V = E + I_a R_a \quad \text{Voltios} \quad \text{--- 1.6}$$

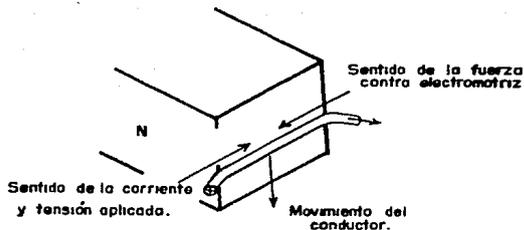


Fig. 1.6 Relación entre el sentido de las corrientes y f.e.m.s. en el conductor de un motor.

En un generador, la f.e.m. inducida es igual a la tensión en bornes más la caída de tensión en el inducido. En un motor, la f.e.m. inducida es igual a la tensión en bornes menos la caída de tensión en el inducido. La f.c.e.m. debe ser siempre menor que la tensión aplicada si se desea que la corriente penetre en el inducido por el borne positivo.

**Ejemplo.** Determinar la f.c.e.m. de un motor de 10 HP. cuando la tensión en bornes es de 230 voltios y el inducido absorbe 40 amperios. La resistencia del inducido es de 0,25 óhmios.

$$E = 230 - (40 \times 0,25) = 230 - 10 = 220 \text{ voltios resp.}$$

En la fig. 1.7 se ilustra un curioso experimento para demostrar la existencia de la f.c.e.m. Un grupo de lámparas se conectan en serie con el inducido de un motor shunt. Primero se cierra el circuito inductor mediante el interruptor  $S_2$ . Luego, el interruptor  $S_1$ .

En el momento de cerrar  $S_1$ , las lámparas se encienden intensamente. A medida que el inducido se va acelerando, estas lámparas se van apagando más y más, lo cual demuestra que en el inducido se está generando una fuerza contraelectromotriz que se opone a la tensión de línea, traduciendo esto en una disminución de tensión y de corriente en las lámparas. Cuando el motor alcanza su velocidad de régimen, las lámparas están apagadas.

Sin embargo, si se abre el interruptor  $S_2$ , el flujo, y por lo tanto la f.c.e.m., se reducen a cero prácticamente, lo cual se pone de manifiesto porque las lámparas vuelven a aumentar su intensidad luminosa.

(En la práctica, cuando un motor está en funcionamiento el circuito inductor no se debe abrir por ningún motivo). Si la tensión es de 230 volts en la fig. 1.7 habrá, evidentemente, que emplear pares de lámparas en serie.

La f.c.e.m. es  $E = K \phi S$  voltios, donde  $K$  es una constante,  $\phi$  es el flujo total que penetra en el inducido desde un polo norte y  $S$  la velocidad del inducido en r.p.m.

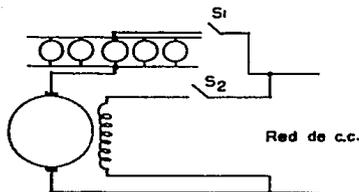


Fig. 1.7 Demostración de la existencia de la f.c.e.m.

## 1.7 P O T E N C I A I N T E R N A .

La potencia total o potencia mecánica interna desarrollada por el inducido de un motor es el producto de la f.c.e.m. inducida y la corriente del inducido. Es decir:

$$P_{in} = E I_a \text{ --- 1.7}$$

Esto se puede demostrar de la forma siguiente:

La potencia absorbida por el inducido es  $V I_a$ , donde  $V$  es la tensión en bornes. La pérdida de potencia en el inducido,  $I_a^2 R$  es a expensas de la potencia eléctrica.

Las otras pérdidas son debidas a los rozamientos, histéresis y corrientes parásitas en el hierro del inducido, y tales pérdidas son a expensas de la potencia mecánica (Véase párrafo 1.5). Por último hay que considerar la potencia útil en la polea. Se sigue, pues, que la única fracción de la potencia absorbida por el inducido  $V I_a$  que no aparece como potencia mecánica es la pérdida por resistencia del inducido  $I_a^2 R_a$ .

Por lo tanto, la potencia interna es:

$$P_{in} = V I_a - I_a^2 R_a = I_a (V - I_a R_a)$$

Pero

$$V - I_a R_a = E \text{ --- 1.5}$$

Por lo tanto

$$P_{in} = E I_a$$

O sea que la potencia en la polea es igual a la potencia interna menos las pérdidas por rozamiento y por la resistencia del inducido.

Ejemplo.- La resistencia del inducido de un motor de 20 HP - 230 Volts y 1 200 r.p.m. es de 0.15 óhmios. Las pérdidas por rozamiento y en el inducido son 500 Vatios. Cuando el inducido absorbe 75 amperios a 230 Voltios, determinar: a) La potencia absorbida por el inducido:

- b) La f.c.e.m.;
- c) La potencia interna;
- d) La potencia en la polea en H.P.

RESP. a)  $P_a = 230 \times 75 = \underline{17250 \text{ Vatios}}$

b)  $E = 230 - (75 \times 0.15) = \underline{218.7 \text{ Voltios}}$

$$c) P_m = 218.7 \times 75 = 16400 \text{ vatios}$$

También  $P_m = (230 \times 75) - (75^2 \times 0.15) = 16400 \text{ Vatios}$

$$d) P'_{im} = \frac{16400 - 600}{746} = \underline{\underline{21.2 \text{ H.P.}}}$$

1.8 Velocidad del motor. La velocidad de un motor es directamente proporcional a la f.c.e.m. e inversamente proporcional al flujo:

$$S = K_1 \frac{E}{\phi} \text{ - - - - - 1.8}$$

Donde  $K_1$  es una constante igual a  $1/K$ . Substituyendo  $E$  en - - (1.8) por su valor dado en (1.5), la velocidad resulta:

$$S = K_1 \frac{V - IaRa}{\phi} \text{ - - - - - 1.9}$$

Esta es una expresión importante, ya que se expresa la Ley de variación de la velocidad con la carga.

Ejemplo. Un motor de 15 HP. y 230 Voltios tiene una resistencia de inducido de 0.16 ohmios. Cuando el inducido observe 25 amperios, la velocidad es de 1000 r.p.m. Cuál es la velocidad cuando la corriente del inducido es de 50 amperios, si la intensidad de campo varía?

Sea  $S_2$  la velocidad cuando la corriente del inducido es de 60 amperios. Aplicando la fórmula 1.9

$$\begin{aligned} S_2 &= K_1 \frac{230 - (60 \times 0.16)}{\phi} \\ S_1 &= K_1 \frac{230 - (25 \times 0.16)}{\phi} \end{aligned}$$

Como el  $\phi$  es el mismo en los dos casos:

$$S_2 = 1000 \frac{230 - 9.6}{230 - 4.0} = 1000 \frac{220.4}{226.0} = \underline{\underline{975 \text{ r.p.m.}}}$$

El ejemplo siguiente sirve para ilustrar el efecto de la variación de la velocidad con la corriente de excitación.

Ejemplo. El flujo en el motor del ejemplo anterior se disminuye en un 10%. ¿Cuál es la velocidad cuando la corriente del inducido es de 60 amperios?:

Puesto que la corriente del inducido no varía, tampoco lo hace la f.c.e.m. por tanto, la fórmula

$$S = K_1 \frac{E}{\phi} \text{ - - - - - 1.10}$$

Se puede aplicar directamente:

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{K_1 E / \phi_2}{K_1 E / \phi_1} = \frac{\phi_1}{\phi_2}; \quad \phi_2 = \underline{\underline{0.9 \phi_1}}$$

Por tanto:

$$S_2 = 975 \frac{\theta_1}{0.9\theta_1} = \frac{975}{0.9} = \underline{\underline{1083 \text{ r.p.m.}}}$$

### 1.9 Reacción de inducido y posición de las escobillas en los motores.

La fig. 1.8 (a) muestra el sentido de la corriente en los conductores del inducido en un motor con las escobillas situadas en la zona neutra. El sentido de la corriente en cada mitad del inducido corresponde a la polaridad y sentido de rotación señalado en (b).

Los amperios - vueltas del inducido crean una f.m.m. Fa.

El flujo producido por esta F.m.m. está dirigido hacia arriba y forma un ángulo recto con el eje de los polos.

En la fig. 1.8 (b) se ve el sentido de la corriente en el inducido y en la excitación.

La resultante de los amperios-vueltas del campo y del inducido crea un flujo que esta dirigido diagonalmente hacia la parte superior de la derecha y se concentra más en los bordes polares de entrada. Es decir, que está distorsionado en sentido contrario al del movimiento. Como la zona neutra es perpendicular a la dirección del flujo resultante, también se desplaza hacia atrás. Por consiguiente, las escobillas se deben retrasar en un ángulo B.

En un motor es, pues, necesario retrasar las escobillas cuando aumenta la carga como se ve en (b). Sino fuera por la f.e.m. de autoinducción, la zona neutra coincidiría con el eje de escobillas. Pero, debido a la necesidad de contrarrestar esta f.e.m., las escobillas se colocan detrás de esta zona neutra de carga, como se puede ver en la fig. 1.8 (b). Es decir, tanto en el motor como en el generador es necesario desplazar las escobillas de la zona neutra con carga para contrarrestar la f.e.m. de autoinducción.

Este retroceso de las escobillas va acompañado de una acción desmagnetizante del inducido sobre el campo como se puede ver por un estudio de la fig. 1.8 (b). Si B es un ángulo que forma el eje de escobillas con la zona neutra, los amperio-vueltas del inducido comprendidos en el ángulo 2B se oponen a los amperio-vueltas del campo, como puede verse aplicando la regla del sacacorchos.

Además, cuando la carga aumenta, la reacción del inducido tiende a aumentar la velocidad del motor. En efecto, se conocen casos en que motores con pequeño entrehierro (teniendo así gran reacción de inducido) se han embalado al aumentar la carga.

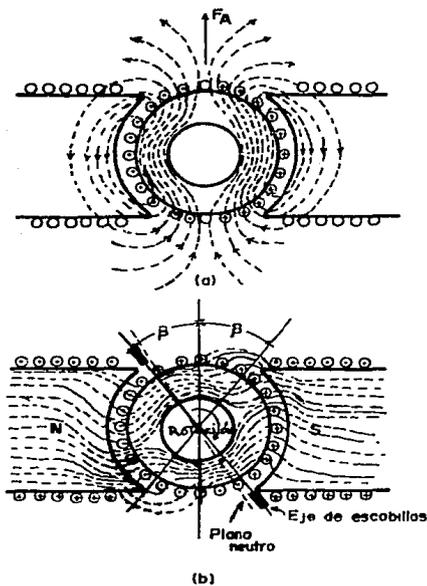


Fig. 1.8 Reacción de inducido en un motor.

1.10 Polos de conmutación. Los polos de conmutación se emplean en los motores, como en las dinamos, para anular la reacción de inducido en la zona neutra y también para inducir una f.e.m. en las bobinas del inducido que están en conmutación y anular la f.e.m. de autoinducción.

La figura 1.9 representa esquemáticamente un motor bipolar. El polo de la izquierda es norte y el de la derecha, sur. La corriente está dirigida hacia afuera del papel en los conductores de la izquierda del inducido, y hacia el papel en los de la derecha.

El inducido gira en el sentido de las agujas del reloj (regla de Fleming de la mano izquierda). La f.m.m. del campo inductor  $F$  actúa de izquierda a derecha, y la del inducido  $F_a$ , hacia arriba (véase la fig. 1.8). Estas direcciones se determinan por la regla del sacacorchos.

Como los interpolos se deben oponer a la reacción de inducido en la zona neutra el de la parte superior del inducido debe ser norte y el de la parte inferior sur como muestra la figura. Además, en los motores, la polaridad relativa de los polos principales y de los interpolos tomada en el sentido de rotación es  $N_n S_s$ , mientras que en las dinamos era  $N_s S_n$  (Véase fig. 1.8). Los interpolos se conectan en serie con el inducido, como en la fig. 1.9.

La acción de los polos de conmutación en los espacios interpolaes es igual en los motores que en las dinamos, salvo que las polaridades son opuestas a las indicadas en dicha figura

Si en un motor se producen chispas por alguna causa desconocida, se debe comprobar la polaridad de los interpolos, pues las chispas pueden ser debidas a que los polos de conmutación no están conectados correctamente.

Al ir provistos los motores modernos de polos de conmutación- sus escobillas no van retrasadas, como puede verse en la fig. 1.8 - - (b), no existiendo, por lo tanto, conductores con amperio-vueltas desmagnetizantes comprendidos dentro del ángulo  $2\beta$ . Sin embargo, y debido a que los extremos adelantados de los polos se saturan al aumentar la carga, existe en realidad una disminución del flujo.

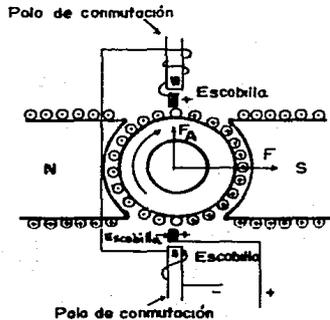


Fig. 1.9 Interpolos en un motor.

#### 1.11 Estructura del motor de C.D.

El motor de corriente directa tiene un estator y un rotor, este último es más conocido como armadura. El estator contiene uno o más devanados por cada polo, los cuales están diseñados para llevar corrientes directas que establecen un campo magnético.

La armadura y su devanado están ubicadas en la misma trayectoria de este campo magnético. Los devanados del estator y los devanados del rotor están conectados físicamente, los devanados del estator se conectan a unas escobillas y los devanados del rotor a un conmutador y al hacer contacto por fricción las escobillas y conmutador se establece la conexión continua de ambos devanados, el conmutador va empo-

trado en la flecha del rotor (giratorio), las escobillas son fijas y están localizadas en el eje neutro magnético de la máquina.

Cuando el devanado de la armadura lleva corriente, establece un campo magnético en cuadratura con el campo magnético de los devanados del estator (fig. 1.10.)

Esto hace que se desarrolle un par que es el que hace girar - el rotor del motor.

Para que la corriente de la armadura, bajo cualquier polo - del estator, circule siempre en el mismo sentido, sin importar la posición en que se encuentre, se necesita del conmutador, que es la - otra función que desarrolla el conmutador (dispositivo mecánico). Si no se utilizará un conmutador, el motor sólo podría dar una fracción de vuelta y luego se detendría.

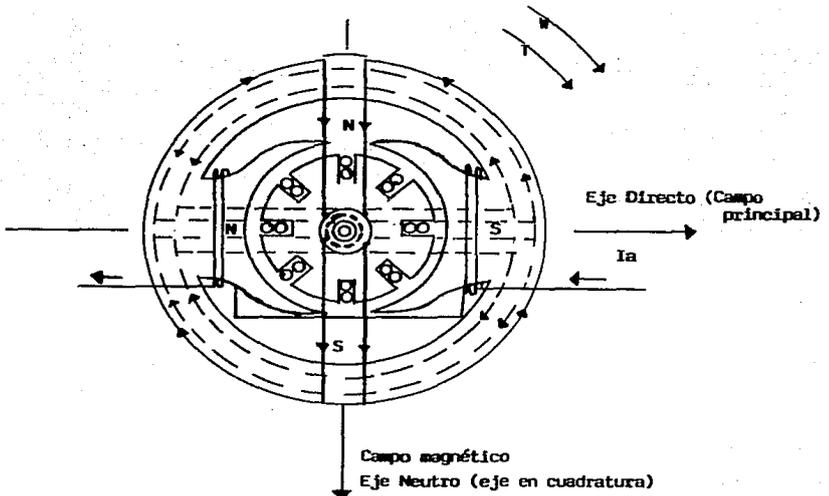


FIGURA 1.10 ESQUEMA DE UN MOTOR

1. 12 Formas de conectar los devanados del estator con los devanados de la armadura (máquinas auto-excitadas).

Se llama campo en derivación; cuando el campo del estator está conectado en paralelo con la armadura (fig. 1.11 a).

Se llama campo en serie, cuando el campo del estator está conectado en serie con la armadura (fig. 1. 11 c)

Cuando se combinan ambas conexiones se llama de campo compuesto.

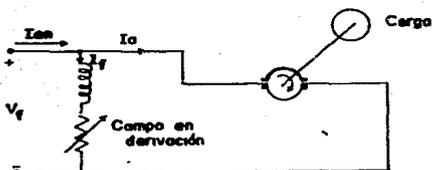
Existen dos formas de conectar el devanado en derivación:

- 1.- Conexión en derivación corta (fig. 1. 11 d)
- 2.- Conexión en derivación larga (fig. 1. 11 b)

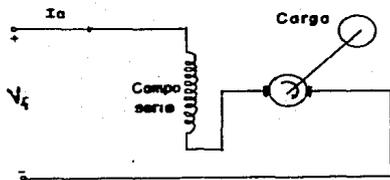
A su vez, existen dos formas también de conectar el devanado en serie:

- 1.- Compuesto acumulativo si se conecta de tal manera que - aumenta el flujo producido por el campo en derivación.
- 2.- Compuesto diferencial si se conecta de tal manera que - disminuya el flujo que produce el campo en derivación.

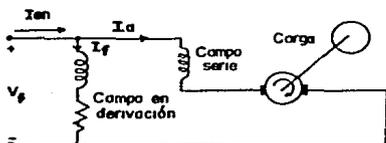
Los devanados en derivación y en serie como se podrá observar están localizados en el estator.



(a)



(c)



(b)



(d)

Fig. 1.11 (a) Motor en derivación de c.d. (b) motor compuesto de c.d. con conexión larga (c) Motor serie de c.d. y (d) Motor compuesto con conexión corta.

1. 13 Características que necesitan tener las máquinas auto excitadas.

- 1.- La estructura magnética debe ser no lineal.
- 2.- Deben poseer algún magnetismo residual en los polos. La polaridad del campo magnético residual se indica con las letras N y S (fig. 1.12)
- 3.- Para la polaridad supuesta del magnetismo residual, la escobilla superior tiene polaridad positiva si la dirección de rotación de la armadura es la de las manecillas del reloj. La escobilla inf. tiene polaridad positiva si la armadura gira en dirección contraria a las manecillas del reloj.
- 4.- El sentido de los embobinados de los polos es el mismo - en los cuatro casos (fig. 1.12).

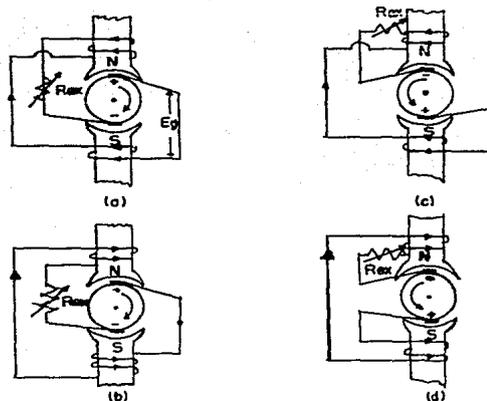


Fig. 1. 12 Configuraciones posibles de un generador de c.d. con excitación propia. En los cuatro casos, N.S., representan la polaridad del magnetismo residual y el sentido del embobinado de campo permanece igual.

Es obvio que no se puede esperar que se genere una Fem. (Fuerza Electromotriz) en las bobinas de la armadura de una máquina autoexcitada si no hay magnetismo residual.

Aún con este requerimiento básico, tienen que satisfacerse algunas otras consideraciones.

Un examen de la fig. 1.12 de la (a) a la (d) muestra que la Fem., generada debido al magnetismo residual cuando se aplica al embobinado de campo, ocasiona una corriente que fluye en él. En las partes de la fig. (a) y (c), el embobinado de campo está conectado a las escobillas, de tal manera que esta corriente ayuda a aumentar el campo magnético residual. Por otra parte, en las figuras (b) y (d), las conexiones del embobinado de campo a las escobillas están hechas de tal manera que la corriente crea un campo magnético en oposición al campo magnético residual, consecuentemente el voltaje se pierde. Por lo tanto cuando las conexiones son como las de las figuras 1.12 (a) y (c) se va generando una Fem., en la armadura en forma ascendente como lo muestra (la Fig. 1.13), hasta quedar limitada por la forma de curva de la estructura magnética no lineal que posee la máquina, con la línea que describe la resistencia del campo del estator. Como podrá observarse en la (fig. 1.13), si la línea de la resistencia de campo es movida hacia ambos lados, así variaría la Fem., generada (esta Fem., en los motores es llamada fuerza contra-electromotriz porque se opone al campo del estator principal), por eso el valor de la resistencia debe estar ajustada a un valor tal que haga que la máquina opere satisfactoriamente

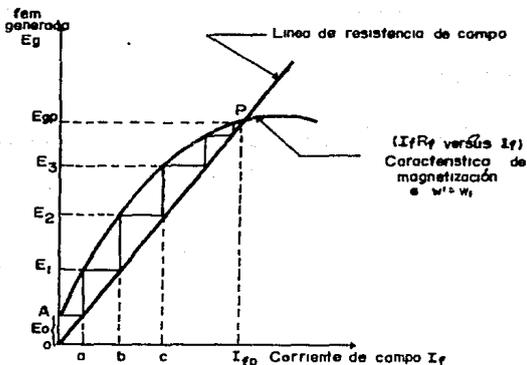


Fig. 1.13 Característica de magnetización.

$$La Egen = K_{gf} W i_f t = E_a = F_{cem}$$

DONDE:

$K_{gf}$  = Constante que depende de la estructura de la máquina

$W$  = Velocidad del rotor

$i_f$  = Corriente de campo del estator

Otra forma de hacer variar la Fem., generada es variando la - velocidad como se puede notar en la fórmula, así que cuando se desee - variar la velocidad deberá tenerse cuidado en no variar más allá de - su rango permitido, tal que no se pueda obtener la Fem., necesaria pa - ra el buen funcionamiento de la máquina.

## CAP. II MOTOR DERIVADO (SHUNT)

## 11.1 Características de Funcionamiento.

Las curvas características de un motor representan como varian el par y la velocidad con la corriente del inducido, siendo constante la tensión aplicada, Estas curvas se pueden dibujar fácilmente a partir de las fórmulas.

$$\text{PAR PRODUCIDO} = K_t \phi I_a$$

$$rpm = \frac{(E_t - I_a R_a)}{K\phi}$$

Siendo:  $E_t$  = La tensión aplicada

$I_a$  = La corriente en el inducido en amperios

$R_a$  = Resistencia en el inducido de ohmios

$I_a R_a$  = La caída de potencial en la resistencia del inducido, que rara vez excede del 5% de  $E_t$  cuando el motor trabaja a plena carga.

$\phi$  = El Flujo por polo

$K$  y  $K_t$  = Constantes.

En el caso de un motor en derivación (véase figura 2.1), la tensión aplicada  $E_t$  y la corriente de excitación  $I_f$  son constantes, como también el flujo por polo, si despreciamos el efecto de la reacción del inducido; en este caso se tiene:

Par motor producido =  $K_t \phi I_a$  = constante X  $I_a$  que es la ecuación de una recta que pasa por el origen. Por otra parte,

$$rpm = \frac{(E_t - I_a R_a)}{K\phi} = \text{constante X } (E_t - I_a R_a)$$

Las curvas que corresponden a estas ecuaciones están representadas en la fig. 2.1. El par proporcionado a la carga mecánica, llamado generalmente par de frenado, es menor que el par electromagnético, siendo la diferencia igual al par resistente producido por el rozamiento en los cojinetes y en las escobillas, las pérdidas en el hierro y la resistencia del aire. La disminución de velocidad cuando aumenta la carga es debida a que  $E_g$  ha de disminuir para que pueda circular una corriente adicional. Las curvas características representadas en la figura 2.1. pueden obtenerse experimentalmente aplicando distintos pares de frenado y midiendo para cada uno de ellos la velocidad y la corriente en el inducido.

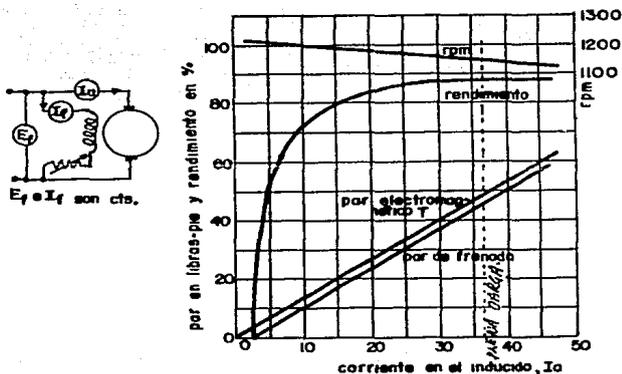


Fig. 2.1 Curvas características de un motor en derivación de 10 CV a 230 V.

### 11.2 Efecto de la reacción del inducido sobre la velocidad.

En el párrafo anterior se desprecia el efecto de la reacción del inducido y se consideró que el flujo  $\phi$  era constante. Sin embargo en la realidad, la reacción del inducido disminuye el flujo  $\phi$  en cierta cantidad, especialmente si el motor carece de polos de conmutación. Por tanto, el denominador de la ecuación de la velocidad disminuye cuando aumenta la corriente del inducido. Algunas veces el tanto por ciento de disminución en el denominador debido a la reducción de  $\phi$  es casi tan grande como el tanto por ciento de disminución en el numerador debido al aumento de  $I_a R_a$ , siendo entonces la curva de velocidad prácticamente una recta mientras el motor pasa de descarga a plena carga.

### 11.3 Regulación de la Velocidad en los Motores en Derivación.

El motor en derivación se denomina motor de velocidad constante porque su velocidad varía sólo ligeramente con la carga. Sin em-

bargo, su característica más estimable es la de ser también un motor de velocidad regulable. Cuando se le provee de resistencias de control adecuadas, puede proporcionar una regulación de velocidad precisa en un amplio margen, y en esto se basa su principal aplicación.

La regulación de velocidad puede estudiarse mejor utilizando la ecuación de la velocidad.

$$\text{rpm} = \frac{E_t - I_a R_a}{K\phi}$$

Cuando el motor se conecta a una línea de tensión constante, como se indica en la Fig. 2.2, con  $E_t$  igual a la tensión nominal del motor y con el reostato de campo colocado en resistencia cero, girará a una cierta velocidad, que se denomina velocidad de pleno campo o vel locidad fundamental. Para obtener velocidades superiores a la correspondiente a pleno campo, puede reducirse el flujo por polo,  $\phi$ , intercalando resistencias en serie con las bobinas de excitación, como indica la figura 2.2. Para obtener velocidades inferiores a la de pleno campo, debe disminuirse la tensión  $E_t$  aplicada a los bornes del motor siendo el procedimiento más fácil de conseguirlo intercalar resistencias en serie con el inducido, como indica la figura 2.3.

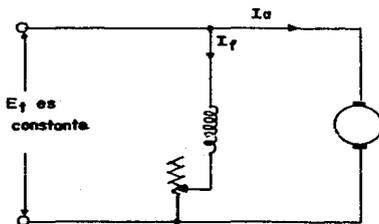


Fig. 2.2 Resistencia intercalada en el circuito de excitación para aumentar la velocidad

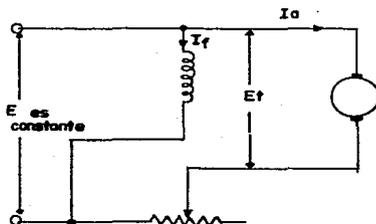


Fig. 2.3 Resistencia intercalada en el circuito del inducido para disminuir la velocidad.

(Métodos para regular la velocidad de un motor en derivación)

Ambos métodos de regulación de velocidad, si pueden utilizarse en un mismo motor, permiten obtener una variación continua de velocidad desde cero a la velocidad máxima para la cual fue proyectado. En el caso de motores sin polos de conmutación, la velocidad máxima queda limitada a 1.7 veces la velocidad de pleno campo, aproximadamente, porque la conmutación resulta deficiente. Esto se debe a que al disminuir  $\phi$  se debilita el flujo en los bordes polares, que cumplen la misión de los polos de conmutación.

#### 11.4 Variación de Velocidad en los Motores en Derivación mediante Control de Campo de Excitación.-

Intercalando resistencias en el circuito de excitación de un motor en derivación, como indica la figura 2.2, disminuye la corriente

te excitadora If y, por consiguiente, disminuye también el flujo  $\Phi$ ; - en consecuencia, y de acuerdo a la ecuación de la velocidad,

$$\text{rpm} = \frac{E_t - I_a R_a}{K\Phi}$$

El motor en derivación girará más de prisa.

Aunque la fórmula indica que la velocidad aumenta cuando el flujo  $\Phi$  disminuye, es aconsejable estudiar con más detalle como se ve en la figura esto. Si se reduce bruscamente el flujo por polo, desciende la fuerza contraelectromotriz del motor y deja que circule más corriente por el inducido. El aumento de corriente en el inducido es mucho mayor que la disminución de flujo, de modo que el par motor producido es mayor que el necesario para la carga y el motor se acelera. El problema siguiente aclara todo esto.

Ejemplo: Un motor en derivación de corriente continúa, de 10 C.V., 110 V, sometido a un ensayo mediante frenado, gira a 900 rpm y proporciona 10 C.V. al freno absorbiendo el inducido una corriente de 75 A de una línea de 110 V. La resistencia del circuito del inducido es 0.03  $\Omega$ . Hálllese:

- El par de frenado a plena carga
- La fuerza contraelectromotriz a plena carga
- El par motor electromagnético a plena carga  
Si se reduce de repente el flujo por polo en un 20 %, intercalando resistencia en el circuito de excitación, determínase:
- La fuerza contraelectromotriz un instante después de variar el flujo.
- La corriente en el inducido en el mismo instante.
- El par motor electromagnético en dicho instante.
- El valor final en régimen permanente de la corriente en el inducido, suponiendo que el par de frenado permanece constante.

SOLUCION:

- El par de frenado a plena carga es;  

$$\frac{\text{Potencia de C.V.} \times 4500}{2.74 \times \text{rpm.}} = \frac{10 \times 4500}{2.74 \times 900} = 7.95 \text{ kg-M}$$
- La fuerza contraelectromotriz a plena carga es;  

$$E_g = E_t - I_a R_a = 110 - (75 \times 0.03) = 104 \text{ V.}$$
- La potencia eléctrica convertida en potencia mecánica es;  

$$E_g I_a = 104 \times 75 = 7800 \text{ W} = \frac{7800}{735} = 10.61 \text{ C.V.}$$

El par motor es;

$$\frac{10.61 \times 4500}{2.74 \times 900} = 8.45 \text{ kg- M}$$

La diferencia entre el par motor y el par de frenado es:

$$8.45 - 7.95 = 0.5 \text{ kg- M}$$

que es igual al par resistente producido por el rozamiento, la resistencia del aire y la pérdida en el hierro del motor.

- d) Si se reduce de repente el flujo en un 20%, la fuerza contraelectromotriz  $E_g$  se reduce también en un 20%, ya que la velocidad no tiene tiempo de variar apreciablemente. En general, los cambios eléctricos son mucho más rápidos que los cambios mecánicos; por consiguiente, la nueva fuerza - contraelectromotriz es:

$$E_g = 80/100 \times 104 = 83.2 \text{ V}$$

- e) Entonces,

$$I_a = \frac{E_t - E_g}{R_a} = \frac{110 - 83.2}{0.03} = 335 \text{ A.}$$

O sea, 4.46 veces la corriente a plena carga.

- f) Por tanto, el par motor (que es proporcional al Flujo y a la corriente que circula por el inducido) es:

$$8.45 \times 80/100 \times 335/75 = 30.19 \text{ Kg-M}$$

O sea, 3.6 veces el par motor a plena carga.

- g) El par electromagnético disponible momentáneamente para la aceleración es:

$$30.19 - 8.45 = 21.47 \text{ Kg-M}$$

El motor se acelera, por tanto, rápidamente. Cuando esto sucede,  $E_g$  aumenta, y, en consecuencia,  $I_a$  y el par motor disminuyen, - descendiendo así la rapidez de la aceleración. La aceleración decrece hasta anularse cuando el par motor se hace igual al par resistente total debido al freno, rozamiento, resistencia del aire y pérdidas en el hierro.

La fig. 2.4 representa gráficamente estos cambios. La corriente  $I_a$  en el inducido no salta en un instante a su valor máximo - cuando varía repentinamente el flujo, pero crece con mucha rapidez en comparación con el cambio relativamente lento de velocidad.

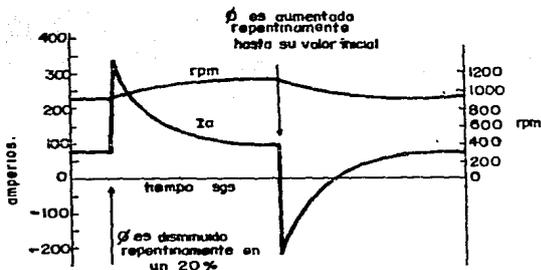


Fig. 2.4 Efecto del control del campo sobre la corriente en el inducido y la velocidad de un motor en derivación supuesto constante el par mecánico de frenado.

Si el par mecánico de frenado se mantiene constante, es decir, independiente de la velocidad, pueden determinarse los valores de  $T$ ,  $I_a$  y rpm correspondientes al valor en régimen permanente final, después del cambio, procediendo como sigue:

1.- Puesto que el par de frenado es constante, por hipótesis el par motor ha de tener el mismo valor que antes del cambio, es decir, 8.45 Kg-M.

2.- Como  $T = K_t \phi I_a$  y  $\phi$  se ha reducido en un 20%, el nuevo valor de  $I_a$  correspondiente al régimen permanente ha de ser correlativamente mayor para mantener constante el producto  $\phi I_a$ , por tanto,

$$I_a = \frac{75}{0.8} = 93.7 \text{ A}$$

3.- El nuevo valor de  $E_g$ , correspondiente al régimen permanente, es  $E_g = E_t - I_a R_a = 110 - (93.7 \times 0.03) = 102.5 \text{ V}$

En el régimen permanente inicial,  $E_g$  era igual a 104 V

Entonces, puesto que  $E_g = K \times \text{rpm} \times \phi$ , se tiene:  
rpm =  $E_g / K\phi$ . Por consiguiente, la nueva velocidad correspondiente al régimen permanente será:

$$930 \times \frac{102.5}{104} \times \frac{100}{80} = 1110 \text{ rpm}$$

La figura 2.4 indica también lo que sucede cuando el flujo aumenta de nuevo repentinamente hasta su valor inicial;  $E_g$  aumenta a

su vez en un instante hasta 128.2 V. Entonces.

$$I_a = \frac{110 - 128.2}{0.03} = - 227 \text{ A.}$$

Esto es, puesto que la fuerza contra-electromotriz es superior a la tensión de la línea, la corriente en el inducido se invierte y el motor funciona momentáneamente como una dinamo que suministra energía a la línea. El par motor se invierte también y la máquina disminuye su marcha muy rápidamente. Cuando sucede esto último, la tensión engendrada  $E_g$  disminuye y pronto se hace inferior a  $E_t$ . Entre tanto, la ha descendido hasta anularse, ha cambiado de sentido y después ha aumentado en el sentido normal para un motor.

### 11.5 Variación de la velocidad de un motor en derivación mediante control de la resistencia del inducido.

Puede hacerse disminuir la velocidad de un motor en derivación disminuyendo la tensión aplicada a los bornes del mismo. Esto se puede conseguir conectando una resistencia en el circuito del inducido, como indica la figura 2.5.

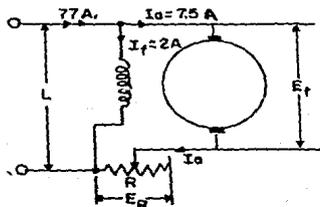


Fig. 2.5 Una resistencia intercalada en el circuito del inducido ocasiona una disminución de la velocidad.

La velocidad está dada por la fórmula:

$$\text{rpm} = \frac{(E_t - I_a R_a)}{K\Phi}$$

En la cual  $I_a R_a$  rara vez excede del 5% de  $E_t$ , de modo que para obtener una velocidad mitad, la tensión aplicada,  $E_t$ , se ha de reducir aproximadamente al 50% de la normal, siendo absorbido el otro 50% de la tensión de la línea por la resistencia intercalada en el circuito; en estas condiciones, la pérdida en la resistencia, que es igual a  $E_R I_a$  es también igual a la potencia  $E_t I_a$  suministrada al inducido, y el rendimiento del sistema es inferior al 50%. El rendimiento real puede calcularse como se hace en el ejemplo siguiente:

Ejemplo: Un motor en derivación de 10 CV, 110 V y 900 rpm - tiene un rendimiento a plena carga de 88%, una resistencia de inducido de 0.08  $\Omega$  y una corriente de excitación de 2A. Si la velocidad -

de este motor se reduce a 450 rpm intercalando una resistencia en el circuito del inducido, pero manteniendo constante el par resistente de la carga, calcúlese la potencia suministrada por el motor, la corriente en el inducido, la resistencia exterior y el rendimiento total.

A la velocidad normal:

Potencia suministrada por el motor = 10 CV

Potencia absorbida por el motor =  $\frac{10}{0.88} = 11.36$  CV = 8349 W.

Corriente total =  $\frac{8349}{110} = 75.9$  A

Corriente de excitación = 2 A

Corriente en el inducido = 73.9 A

Par resistente =  $\frac{10 \times 4500}{2 \times 97 \times 900} = 7.95$  Km-M

Fuerza contraelectromotriz =  $E_t - I_a R_a = 110 - (73.9 \times 0.08) = 104.1$  V

A velocidad mitad:

Potencia suministrada;  $\frac{PAR \times 2 \times 97 \times rpm}{4500}$  C. V., y

Puesto que el par se supone constante, la potencia suministrada es - proporcional a la velocidad y será igual a 5 CV.

El par motor es K.Øia, y puesto que el par es constante, como así mismo la excitación, la corriente en el inducido la es la misma - que a la velocidad de 900 rpm, o sea 73.9 A. La fuerza contraelectromotriz  $E_g$  es engendrada en el inducido por el corte de líneas de flujo, siendo igual a una constante  $\times \phi \times rpm$ , y dado que el flujo es - constante,  $E_g$  es proporcional a la velocidad e igual a  $0.5 \times 104.1 = 52.05$  V.

La tensión aplicada al motor será:

$E_g + I_a R_a = 52.05 + (73.9 \times 0.08) = 57.95$  V

La caída de potencial en la resistencia exterior es:

$110 - 57.95 = 52.04$  V

La corriente en esta resistencia es 73.9 A

Resistencia exterior =  $\frac{52.04}{73.9} = 0.7$  Ω

Pérdida en la resistencia =  $52.04 \times 73.9 = 3846$  W

Potencia total absorbida =  $110 \times (73.9 + 2) = 8349$  W

Potencia suministrada por el motor = 5 CV =  $5 \times \frac{735}{1000} = 3.675$  KW

Rendimiento total =  $\frac{3.675}{8.349} = 44\%$

Puesto que la corriente en el inducido (y, por consiguiente, las pérdidas en el arrollamiento del mismo) tiene igual valor a la velocidad mitad que a toda velocidad, siendo el par constante, la temperatura se elevará más a pequeña velocidad, a causa de la menor ventilación.

Por el problema anterior puede verse que cuando la velocidad de un motor se reduce introduciendo una resistencia en el inducido, - la potencia suministrada por el motor disminuye y es directamente proporcional a la velocidad, mientras que la elevación de temperatura con esta potencia reducida es mayor que la normal a causa de la deficiente ventilación. El rendimiento total es, por consiguiente, excesivamente bajo, siendo el tanto por ciento de pérdidas en la resistencia igual aproximadamente al tanto por ciento de la reducción de la velocidad, esto es, el 50% de la potencia absorbida a velocidad mitad y - el 75% para una velocidad igual a la cuarta parte.

## 11. 6 Regulación de la velocidad de un motor en derivación.

Cuando la velocidad de un motor varía mucho con los cambios de carga, se dice que la regulación es deficiente, mientras que si la velocidad es prácticamente constante para todas las cargas, diremos que la regulación es buena.

La regulación de velocidad de un motor de corriente continua es la variación de velocidad cuando la carga se reduce gradualmente - desde la carga total nominal a cero, permaneciendo constantes la tensión de la línea y la posición del réostato de campo.

Supongamos que la velocidad de un motor en derivación se ajusta por medio de una resistencia colocada en el circuito del inducido, como indica la figura 2.5, para que dé una velocidad determinada con una carga fija. Entonces, si aumenta la carga, la corriente en el inducido  $I_a$  y la tensión  $E_r$  aumentarán y, por consiguiente, la tensión - Et disminuirá y la velocidad del motor descenderá. En consecuencia, - la regulación de velocidad es deficiente cuando se utiliza control de resistencia en el inducido.

Así por ejemplo en el problema de la sección 11.5, en el cual el motor gira a una velocidad mitad con control de resistencia de inducido, circulando por él la corriente de plena carga, si el par resistente se duplica, el motor se parará, porque al duplicarse la corriente, la caída  $IR$  en la resistencia de control será igual a la tensión en la línea y se anulará. Eg para permitir que pueda circular esta corriente.

Por el contrario, si se suprime por completo la carga, el motor se acelerará para engendrar una mayor fuerza contraelectromotriz que reduzca la corriente en el inducido. Una corriente en el inducido de unos 5A proporcionará un par suficiente para vencer la resistencia de los rozamientos y del aire, y cuando  $I_a = 5A$ , la caída  $IR$  en la resistencia de control será solamente  $5 \times 0.7 = 3.5 V$ , en lugar de los 52.04 V que existían antes de quitar el par resistente. Así, - - pues, la tensión aplicada al inducido se elevará en  $52.04 - 3.5 = 48.54 V$  y, por tanto, la velocidad se duplicará, aproximadamente. -

Cuando la velocidad de un motor en derivación se regula por medio de una resistencia colocada en el circuito de excitación, como indica la figura 2.2, la regulación de velocidad es buena. La velocidad está dada por la fórmula:

$$rpm = \frac{E_t - I_a R_a}{K \phi}$$

de modo que siendo  $E_t$  constante, como asimismo el flujo  $\phi$ , una vez que se ha fijado la resistencia de campo, la disminución de velocidad entre vacío y plena carga rara vez excede del 5%, puesto que  $I_a R_a$  a plena carga excede rara vez del 5% de  $E_t$ .

#### 11.7 Comparación entre la regulación de la velocidad por control de la resistencia de inducido y por control del campo de excitación.

El control del campo de excitación de los motores en derivación da velocidades definidas que son aproximadamente independientes de la carga, y todos los cambios de velocidad se efectúan sin disminuir el rendimiento. Como contrapartida, este método queda limitado a las velocidades que son superiores a la velocidad fundamental que se obtiene con pleno campo.

Dentro de este margen de velocidades, proporciona una regulación que es prácticamente ideal.

La regulación mediante control de la resistencia de inducido es inferior a la anterior, porque reduce el rendimiento del motor en la misma proporción en que disminuye la velocidad. Esto limita grandemente su posibilidad de aplicación y hace que, en general, se emplee solamente para reducciones de velocidad durante corto tiempo, excepto en el caso de pequeños motores, en los cuales la cantidad de energía que interviene no es importante.

Otro aspecto desfavorable de la regulación por control de la resistencia del inducido es que ninguna posición del reóstato corresponde a una velocidad definida, pues dicha velocidad queda determinada, tanto por la carga como por la resistencia de control. Esto puede o no constituir una objeción en una aplicación determinada.

Como contrapartida, el control de la resistencia del inducido proporciona un margen de velocidades posibles, que no puede alcanzar el control de campo, a saber el comprendido entre cero y la velocidad de pleno campo, por lo que es un método de regulación de velocidad importante y valioso.

Las limitaciones del método de regulación de velocidad por resistencia en el inducido han traído como consecuencia la utilización de otros métodos para reducir  $E_t$ . Uno de los más importantes es el sistema Ward-Leonard de regulación de velocidad.

#### 11.8 Sistema Ward-Leonard de regulación de velocidad.

Un método muy eficaz para obtener un amplio margen de veloci-

dades sin utilizar resistencia de inducido, con sus consiguientes desventajas, es utilizar un dínamo independiente para accionar el motor de velocidad regulable y variar la excitación de la dinamo de modo que se modifique la tensión aplicada a los bornes del motor.

Este sistema está representado esquemáticamente en la figura 2.6.

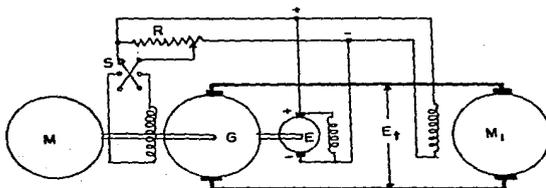


Fig. 2.6 Control de velocidad por el sistema Ward Leonard.

El equipo se compone del motor  $M_1$ , cuya velocidad ha de regularse, y de un grupo moto-generador de velocidad elevada compuesto de las tres unidades  $M$ ,  $G$  y  $E$ , montadas las tres sobre el mismo eje.  $G$  es una dinamo con excitación independiente que acciona al motor  $M_1$ ,  $E$  es una pequeña dinamo autoexcitada, denominada excitatriz que proporciona la corriente de excitación tanto para la dinamo como para el motor  $M_1$  y  $M$  es el motor que acciona las dinamos  $G$  y  $E$ . En la práctica,  $M$  es generalmente un motor de corriente alterna de velocidad constante, aunque a veces es un motor diésel o un motor de corriente continua cuando es de esta clase de corriente de la red, en cuyo caso puede suprimirse la excitatriz  $E$  y utilizar dicha corriente de la red para la excitación de  $G$  y  $M_1$ .

El grupo motor-generador gira a velocidad aproximadamente constante, por estar accionado por un motor de velocidad constante, y, por consiguiente, la tensión engendrada por la excitatriz  $E$ , las corrientes de excitación, la tensión  $E_g$  y la velocidad del motor  $M_1$  son todas constantes mientras no se haga ningún cambio en el reóstato  $R$ . La velocidad del motor  $M_1$  puede ajustarse a cualquier valor, desde cero hasta un valor máximo, en uno u otro sentido, por medio del reóstato potenciométrico  $R$  y el conmutador inversor  $S$ . Cada posición del contacto deslizante del reóstato da una velocidad determinada al motor  $M_1$ , y esta velocidad cambia casi con la misma rapidez con que se mueve el contacto; es decir, la respuesta es casi instantánea. Así, por ejemplo, en un caso de aplicación de este tipo de regulación de velocidad, un motor de 100 CV accionando una cizalla para cortar laminas de acero se acelera hasta alcanzar la velocidad máxima de 450

rpm, hace el corte y se detiene en un tiempo total inferior a un segundo.

Añn en el caso de los motores de 2000 a 7000 CV, utilizados - para accionar trenes reversibles de laminar acero, por este método -- se pasa de la velocidad máxima, en un sentido a la misma velocidad en sentido opuesto en un tiempo que varfa entre tres y cinco segundos.

Cuando el contacto deslizante del reóstato R se encuentra en el extremo de la derecha, el motor  $M_1$  gira a velocidad máxima. Para invertir el motor sólo es necesario deslizar el contacto móvil de R - hasta el extremo de la izquierda, invertir el conmutador S y después - mover el contacto deslizante nuevamente hacia la derecha.

La razón de que la velocidad del motor responda tan rápidamente a cualquier cambio en la posición del reóstato, se comprende mejor considerando la ecuación que da la corriente en el inducido.

$$I_a = \frac{E_t - E_g}{R_a}$$

Ahora bien:  $R_a$  es pequeño, y en funcionamiento normal  $E_t$  y -  $E_g$  son aproximadamente iguales; en consecuencia, si  $E_t$  se duplica de pronto, deslizando el contacto móvil hacia la derecha,  $I_a$  se hace - muy grande, el par motor ( $K\phi I_a$ ) también crece mucho y el motor acelera muy rápidamente. De forma análoga, si  $E_t$  se reduce repentinamente a la mitad, deslizando el contacto de reóstato hacia la izquierda, la se invierte, originando un gran par negativo. Como consecuencia, el motor decelera muy rápidamente hasta que  $E_g$  es de nuevo inferior a  $E_t$ . Durante este período momentáneo de inversión de la, el motor  $M_1$  funciona realmente como dinamo y transforma la energía cinética de rotación en energía eléctrica. La dinamo G se convierte en motor y empuja al motor M, obligándole a convertirse en un generador, y de este modo la energía cinética de rotación del motor  $M_1$  es devuelta a la - red de alimentación.

## 11.9 Aplicación del sistema Ward Leonard de regulación de velocidad.

Este tipo de control de velocidad tiene un costo elevado de - instalación, puesto que se requieren tres máquinas para hacer el trabajo de una. El motor M transforma la energía eléctrica recibida de la línea (No representada) en energía mecánica, que es transmitida - por el eje a la dinamo G. Esta dinamo transforma de nuevo la energía mecánica en eléctrica y el motor  $M_1$  convierte finalmente la energía eléctrica en mecánica. Además, cada máquina disipa del 5 al 8% - de la energía en este proceso. No obstante, hay muchas aplicaciones - en las cuales la calidad del servicio es de suprema importancia y el costo de instalación es un factor relativamente secundario.

El sistema Ward Leonard de regulación de velocidad, con dis-- tintas modificaciones de menor importancia, se utiliza ampliamente. - Su principal aplicación es en las fábricas siderúrgicas para accionar trenes reversibles de laminación, obtener tubos sin soldadura e impulsar cizallas; para accionar ascensores de velocidad media y elevada -

en grandes edificios, malacates de minas y para mover máquinas de fabricar papel. Los locomotores eléctricos del Gran Ferrocarril del Norte, en Estados Unidos, funcionan por el sistema Ward Leonard, así como las excavadoras mecánicas y volquetes de vagones. La delicada regulación de velocidad necesaria para el funcionamiento de las torres de cañones en los barcos de guerra se consigue por el sistema Ward Leonard, y existen, además, otras numerosas aplicaciones.

#### 11.10 ACCION RECUPERADORA DEL SISTEMA WARD LEONARD.

Una característica importante del sistema Ward Leonard es su funcionamiento recuperador. Así por ejemplo, cuando una locomotora equipada con el sistema Ward Leonard desciende por la falda de una montaña, tiende a acelerarse bajo acción de la gravedad, y así aumenta la velocidad del motor  $M_1$  hasta que la F.e.m. engendrada  $E_g$  es mayor que  $E_c$ .

Como consecuencia, la corriente la que circula por G y  $M_1$  se invierte, y  $M_1$  funciona como dinamo y G como si fuera un motor, el cual a su vez acelera al motor M, obligándole a convertirse en generador que devuelve energía eléctrica al cable conductor. No sólo se economiza por este procedimiento una cantidad considerable de energía, sino que la acción de frenado es muy superior, en suavidad, potencia y seguridad, a la que se puede obtener con cualquier otro tipo de frenado por rozamiento.

Puesto que  $E_c$  es ajustable, se puede obtener la acción de frenado a cualquier velocidad.

Un ascensor que desciende con una carga pesada o que sube con una carga ligera (inferior al contrapeso) devuelve también a la red energía eléctrica.

Análogamente, la energía cinética almacenada en las partes rotatorias y móviles de un tren de laminación es recuperada parcialmente cuando el sistema queda en reposo, como se ha indicado en la sección 11.8.

En el caso de los trenes eléctricos Diesel, el motor M de la figura 2.6 es un motor Diesel, siendo imposible por tanto, obtener un frenado recuperador. También los motores  $M_1$  son motores serie. Sin embargo, se obtiene un frenado suave y potente haciendo funcionar los motores  $M_1$  como dinamos con excitación independiente y conectando resistencias entre sus bornes.

#### 11.11 EMPLEO DE VOLANTE EN EL SISTEMA WARD LEONARD.

Si existe la posibilidad de que las violentas fluctuaciones de potencia requerida, que se producen en muchas de las aplicaciones del sistema Ward Leonard, resulten incómodas, es decir, si hay probabilidades de ocasionar grandes fluctuaciones de tensión en la red, que puedan interferir el funcionamiento de otras instalaciones conectadas a la misma, se monta un volante en el eje del grupo motor-generador; pero el motor M ha de ser entonces de un tipo que tenga una ca

característica de velocidad descendiente, para poder permitir al volante absorber y ceder energía. El que sea o no, necesario un volante depende de los tamaños relativos del grupo motor-generador y de la central suministradora de potencia. Naturalmente, con un volante sólo pueden salvarse sobrecargas de muy poca duración.

## CAP. III MOTOR SERIE

## III.1 Curvas características.

En la figura 3.1 se representa la conexión de un motor serie a la red. Como en el caso del motor en derivación se debe colocar una resistencia de arranque en serie con el inducido (fig. 3.2), a menos que la potencia nominal del motor sea inferior a 1 C.V., para limitar la corriente de arranque.

Esta resistencia se va reduciendo poco a poco a medida que el motor aumenta su velocidad. Los motores serie con potencia inferior a un caballo de vapor se arrancan conectándolos directamente a la red.

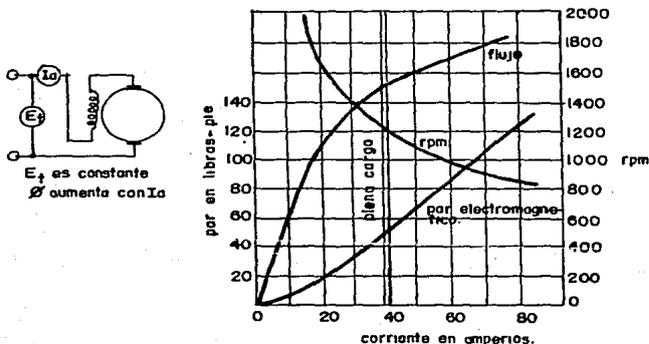


Fig. 3.1 Curvas características de un motor serie de 10 CV a 230 V.

III. 2 Par de arranque.- La tensión aplicada  $E_t$  es constante, mientras que la excitación de campo aumenta con la carga, puesto que la corriente del inducido es también la corriente excitadora.

El par producido,  $K_t \phi I_a$ , es directamente proporcional al flujo  $\phi$  por polo y a la corriente en el inducido. Ahora bien:  $\phi$  aumenta con  $I_a$ , puesto que ésta es también la corriente de excitación y si el circuito magnético de la máquina no está saturado, es directamente proporcional a  $I_a$ , y el par motor es proporcional, por consiguiente, a  $I_a^2$ . En un motor real, el flujo por polo no aumenta tan rápidamente como la corriente de excitación, debido a la saturación del circuito magnético, sino que varía con  $I_a$ , como puede verse en la fig. 3.1 Utilizando esta curva de flujo y la ecuación del par,  $T = K_t \phi I_a$ , se ha determinado el par electromagnético que aparece representado en dicha figura.

La corriente de plena carga produce flujo y par de plena carga independientemente de que el motor gire o esté parado. Puesto -

que el flujo aumenta con la corriente, se origina un par doble que el de plena carga con una corriente de considerablemente menor que dos veces la corriente de plena carga. En la fig. 3.1 se produce un par doble que el de plena carga con una corriente que es 1.67 veces la corriente de plena carga.

En el caso de un motor en derivación, el flujo por polo es constante y el par es directamente proporcional a la, de modo que un par doble requiere una corriente doble.

Para arranques difíciles el motor serie resulta, por consiguiente, superior al motor en derivación, puesto que requiere tomar menos corriente de la línea.

### III. 3 CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO.

Las curvas caracterísitcas de un motor serie pueden detenninar se fácilmente a partir de las fórmulas fundamentales:

$$\text{PAR MOTOR} = K\phi I_a$$

$$\text{r.p.m.} = \frac{E_t - I_a R_a}{K\phi}$$

Siendo:

- $E_t$  = La tensión aplicada
- $I_a$  = La intensidad de la corriente en el inducido en amperios.
- $R_a$  = La resistencia combinada del inducido y de las bobinas de excitación en serie.
- $I_a R_a$  = La caída de potencial en el inducido y en las bobinas de excitación, que rara vez excede del 7% de  $E_t$  cuando el motor funciona a plena carga.
- $\phi$  = El flujo por polo
- $K_t$  y  $K$  = Constantes

En el caso del motor serie, la tensión aplicada  $E_t$  es constante, mientras que el flujo por polo varía con la, como indica la figura 3.1. Las curvas del par y la velocidad en función de la corriente en el inducido están representadas en la figura 3.1, de acuerdo con las ecuaciones precedentes para el par y la velocidad.

Es importante observar que cuando la carga (y, por consiguiente la corriente en el inducido) decrece, también disminuye el flujo por polo y la máquina a de acelerar para producir así la fuerza contraelectromotriz requerida.

Para cargas ligeras, la velocidad se hace peligrosamente elevada, y por esta razón un motor serie ha de estar siempre engranado o acoplado directamente a la carga. Si un motor serie estuviera unido a la carga mediante una correa y esta se rompiese o soltase, el motor se embalaría y probablemente reventaría.

Los motores serie son adecuados para grúas, por que producen un gran par de arranque, van despacio cuando elevan un gran peso y de prisa con cargas ligeras. Los motores de las grúas están siempre engranados a tornos de elevación y permanecen en todo instante bajo control de operador. Los motores de los tranvías son generalmente motores serie. Su potente par de arranque los hace particularmente adecuados para este servicio.

#### III.4 REGULACION DE LA VELOCIDAD.

La velocidad de un motor serie es proporcional a;  $\frac{E_t - I_a R_a}{\phi}$

de modo que para una corriente la dada, la velocidad puede variarse - modificando la tensión aplicada  $E_t$ , o el flujo por polo  $\phi$

Si se intercala una resistencia  $R_e$  en serie con el inducido, - como indica la figura 3.2, la tensión aplicada a los bornes del motor se reduce en la  $R_e$  y la menor fuerza contraelectromotriz requerida se obtiene a una velocidad menor.

Aplicando un potencial constante y con una corriente dada en el inducido, se puede aumentar la velocidad disminuyendo el flujo por polo. Cabe realizar esto como indica la figura 3.3, poniendo en derivación las bobinas de excitación con una resistencia, de modo que de la corriente total la sólo se permita que circule una parte por el - arrollamiento de excitación.

Puede reducirse también, el flujo por polo corto circuitando - parte del arrollamiento de excitación, según incida la figura 3.4; si se cierra el interruptor S, se reducen los amperios-vuelta de excitación, y esto ocasiona una disminución del flujo y, en consecuencia, - un aumento de la velocidad del motor.

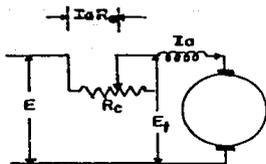


Fig. 3.2

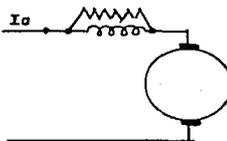


Fig. 3.3

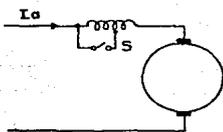


Fig. 3.4.

## CAP. IV

## MOTOR COMPUESTO (COMPOUND)

## IV. 1 GENERALIDADES.

El motor compuesto constituye un término medio entre el motor en derivación y el motor serie, y se conecta a la red como indica esquemáticamente la fig. 4.1. La tensión aplicada  $E_t$  es constante, como asimismo la corriente en la derivación  $I_f$ ; pero la corriente en las bobinas de excitación en serie se eleva con la carga, de modo que el flujo por polo aumenta también con la carga, pero no tan rápidamente como en el motor serie.

Las características de velocidad y par de un motor compuesto, un motor serie y un motor en derivación, proyectadas para dar el mismo par y la misma velocidad a plena carga, están representadas en la fig. 4.1. Al variar las proporciones de las fmm, de los campos en derivación y serie, se pueden diseñar los motores compuestos con características de velocidad y par de arranque intermedias entre las de los motores en derivación y serie. En muchas ocasiones se proporciona sólo el campo en derivación suficiente sólo para garantizar una velocidad estable sin carga, en cuyo caso el motor se puede llamar motor serie estabilizado. A los motores de potencia inferior a un caballo, diseñados para aplicaciones de velocidad relativamente constante, suele darseles un pequeño grado de composición, por lo que se pueden arrancar conectándolos directamente a la red. La composición asegura un arranque rápido y elimina prácticamente la quemadura del colector que de otra manera puede producirse.

Los grandes motores en derivación que funcionan a velocidades elevadas están sujetos a grandes variaciones de la corriente del inducido cuando varía la tensión de la línea, en especial si las cargas que mueven tienen momentos de inercia muy elevados. Un descenso súbito de la tensión de la línea puede anular con facilidad la corriente del inducido o llegar a hacerla momentáneamente negativa. Del mismo modo, aumentos rápidos de la tensión de la línea llegan a producir violentas oscilaciones de la corriente del inducido, las cuales se reducen considerablemente añadiendo un pequeño campo en serie. Un motor en derivación con una ligera composición para estabilizar la absorción de potencia se denomina generalmente motor en derivación estabilizado.

IV. 2 Motor con composición diferencial.- Si las conexiones del arrollamiento serie de un motor compuesto se permutan para invertir el sentido de circulación de la corriente en el mismo, las bobinas serie se opondrán al flujo y éste decrecerá, en lugar de crecer cuando aumenta la carga. Esto obligará a que el motor se acelere en vez de desacelerarse. A menos que la composición sea muy ligera, el funcionamiento de un motor de este tipo será peligrosamente inestable, especialmente si la carga mecánica es de tal naturaleza que su par de retardo aumenta con la velocidad. Un incremento en la carga hace que la excitación serie debilite el flujo y disminuya así  $E_g$ , lo que produce un aumento adicional en la corriente. Esta corriente extra desrolla un par adicional, que reduce todavía más el flujo y  $E_g$ , lo que hace circular más corriente y reduce aún más el flujo. El proceso es

acumulativo y muy rápido. Al cabo de pocos segundos el motor está girando a gran velocidad y absorbiendo de la red una enorme corriente, y si no hubiera dispositivos protectores en la línea se quemaría o saltaría en trozos. Por ello, al conectar los motores compuestos debe ponerse especial cuidado en evitar la conexión diferencial.

IV. 3 VOLANTE Y MOTOR COMPUESTO.- Siempre que una carga mecánica está sometida a pulsaciones violentas de corta duración, como en las cizallas y prensas punzadoras, se acopla generalmente un volante para suprimir los picos y suavizar la carga en el motor. Sin el volante, el motor habría de ser mucho mayor. Con el fin de que el volante almacene y entregue energía alternativamente debe permitirsele que reduzca su velocidad mientras lleva la carga de pico, y la aumenta de nuevo entre los picos de carga. Para realizar esto es ideal, el motor compuesto. Un motor en derivación no bajaría su velocidad lo suficiente para permitir que el volante se lleve parte del pico, a menos que se le diese una característica de caída de velocidad insertando una resistencia en serie con el inducido, lo que implicará una considerable pérdida  $I^2R$ .

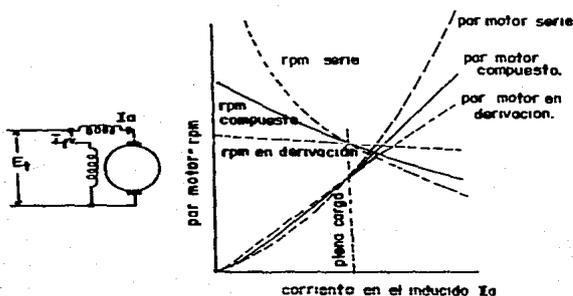


Fig. 4.1 Curvas características de un motor compuesto.

## CAP. V. ARRANQUE DEL MOTOR DE C.D.

## V. 1 ARRANCADORES MANUALES DE C.C.

## A) GENERALIDADES.

Un regulador eléctrico pueda definirse como =dispositivo (o grupo de ellos) que sirve para gobernar, de una forma prefijada, la potencia eléctrica suministrada al aparato al cual está conectado.= El término =gobierno= suele usarse para significar variación, modificación o modulación de la potencia que se hace llegar al aparato (motor). El término =prefijado= puede interpretarse como la secuencia deseada, determinada o condicionada que es capaz de ofrecer o de afectar al regulador.

Un arrancador eléctrico se define como un regulador cuya función principal es la de poner en marcha y acelerar un motor.

El término =manual= asocia la mano de un ser humano (o su equivalente) en combinación con un arrancador eléctrico.

Esta combinación es, quizá, la más alambicada de todos los servomecanismos. Lleva consigo dos argumentos: (a<sup>1</sup>) que el ser humano posee inteligencia y (2) que esta inteligencia se aplica con objeto de hacer funcionar un arrancador manual para que un motor pueda ser puesto en marcha adecuadamente y acelerado bajo diferentes condiciones de carga para alcanzar su velocidad nominal.

## B) PUESTA EN MARCHA Y ACELERACION DE MOTORES DE C.C.

La figura 5.1 muestra, en forma esquemática, la resistencia en serie con el circuito del inducido que se precisa para la aceleración de motores serie, shunt o derivación y compound o compuesto, respectivamente, con un dispositivo de arranque manual para eliminar la resistencia en serie del inducido en seis etapas. Se observará que los motores shunt y compound suelen ponerse en marcha con la corriente de plena excitación, es decir, la resistencia del réostato del campo es nula, y el motor serie se pone en marcha siempre bajo carga.

En el instante en que se aplica una tensión,  $V_a$ , en bornes del inducido para hacer que gire el motor, el inducido del motor no produce ninguna f.c.e.m. ya que la velocidad es nula. Los únicos factores que limitan la corriente son la c.d.t. en las escobillas y la resistencia del circuito del inducido,  $R_a$ . Como ninguno de ellos bajo condiciones normales sobrepasa el 10 ó el 15 por ciento de la tensión aplicada en bornes del inducido,  $V_a$ , la sobrecarga llega a muchas veces la corriente nominal del inducido, como se indica en el ejemplo 5.1.

## Ejemplo 5.1.

Un motor shunt de 120 V de c.c., tiene una resistencia de 0,2  $\Omega$  y una c.d.t. en las escobillas de 2V. La corriente nominal a plena carga del inducido es de 75.A. Calcular la corriente en el instante del arranque y el porcentaje de plena carga.

Solución:

$$I_a = \frac{V_a - B_D}{R_a} = \frac{120 - 2}{0,2} = 590 \text{ A (f.c.e.m. nula)}$$

$$\text{Porcentaje a plena carga} = \frac{590 \text{ A}}{75 \text{ A}} = 786 \text{ por ciento.}$$

El ejemplo 5.1 sirve para ilustrar el desperfecto que puede ocasionarse a un motor a menos que la corriente de arranque se limite por medio de un arrancador.

Los arrancadores de motor comerciales, tanto manuales como automáticos, se examinarán con detalle en otras secciones, pero la breve descripción que sigue representa una introducción al tema. La corriente en el ejemplo 5.1. es excesiva a causa de una falta de f.c.e.m. en el instante del arranque.

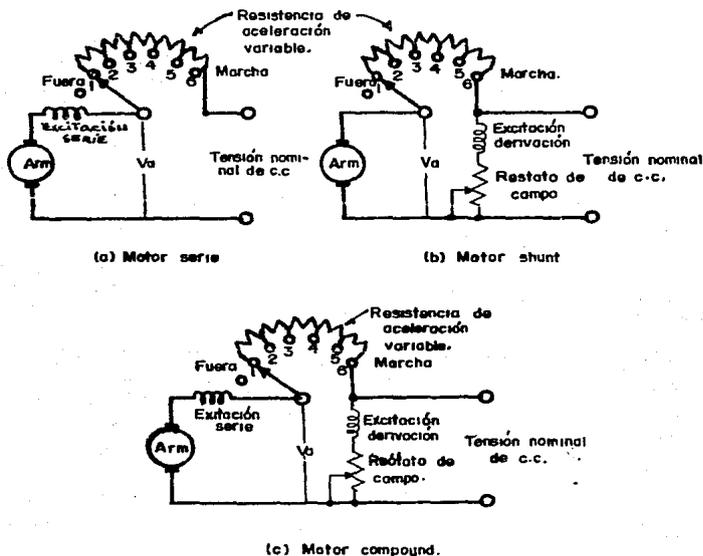


Fig. 5.1 Esquema que indica cómo la resistencia de inducido de aceleración se conecta y se regula en el circuito del inducido para acelerar motores serie, shunt- y compound.

Una vez iniciada la rotación, se produce la f.c.e.m. en proporción con la velocidad. Luego lo que requiere es un dispositivo, generalmente una resistencia de tomas o variable, cuya finalidad es la de limitar la corriente durante el período de arranque y cuya resistencia puede ser reducida progresivamente a medida que el motor adquiere velocidad. Para una resistencia externa determinada,  $R_s$ , en serie en el inducido, la ecuación anterior, debe modificarse para el cálculo de la corriente del inducido.

Ecuación (5.1)

$$I_a = \frac{V_a - E_c - BD}{R_a + R_s}$$

Donde:

 $V_a$  = Tensión aplicada al inducido $E_c$  = F.c.e.m. generada en el inducido

BD = C.d.t. en las escobillas

 $R_a$  = Resistencia del inducido

El valor de la resistencia en el arranque a velocidad nula o en cualquier contacto puede calcularse por medio de la ecuación 5-1 - como se ilustra en el siguiente ejemplo:

Ejemplo 5-2 Calcular los diversos valores (tomas) de la resistencia de arranque para limitar la corriente del motor del ejemplo 5.1 a:

- 150 por ciento de la carga nominal en el instante del arranque.
- Una f.c.e.m. que representa el 25 por ciento de la tensión del inducido,  $V_a$ , al 150 por ciento de la carga nominal.
- Una f.c.e.m. que represente el 50 por ciento de la tensión del inducido al 150 por ciento de la carga nominal
- Hallar la f.c.e.m. a plena carga, sin resistencia de arranque.

Solución

$$R_s = \frac{V_a - E_c - BD}{I_a} - R_a \quad (\text{de la ecuación (5.1)})$$

$$a) \text{ en el arranque, } E_c \text{ es nula; } R_s = \frac{V_a - BD}{I_a} - R_a = \frac{120 - 2}{15 \times 75} - 0.2 = 0.85 \, \Omega$$

$$b) R_s = \frac{V_a - E_c - BD}{I_a} - R_a = \frac{120 - 30 - 2}{1.5 \times 75} - 0.2 = 0.582 \, \Omega$$

$$c) R_s = \frac{120 - 60 - 2}{1.5 \times 75} - 0.2 = 0.316 \, \Omega$$

$$d) E_c = V_a - I_a R_a - B D = 120 - (75 \times 0,2) - 2 = 103 \text{ V}$$

Obsérvese que, en el ejemplo 5-2, se requiere un valor progresivo decreciente de la resistencia de arranque, cuando el motor origina una f.c.e.m. en aumento, como resultado de la aceleración. Este es el principio del arrancador de resistencia de inducido.

La forma en que funciona un arrancador en combinación con los tres tipos básicos de dinamos de c.c., utilizadas como motores, se muestra en la figura 5.1. Los procedimientos aquí mostrados para el arranque de motores son sólo esquemas simplificados; las disposiciones comerciales de arrancadores manuales y automáticos y de reguladores se abordan en las secciones C a la F.

Los motores shunt y compound se ponen en marcha con excitación a pleno campo (es decir, toda la tensión de la línea se aplica al circuito de excitación) para desarrollar el par máximo de arranque ( $T = k \phi I_a$ ). En los tres tipos de dinamos, la corriente de inducido en el arranque está limitada por una resistencia de arranque variable de gran potencia conectada en serie. En la práctica, la corriente de entrada inicial de inducido, generalmente está limitada a un valor más elevado que la corriente a plena carga (ver ejemplo 5-2) para originar un mayor par de arranque, particularmente en el caso de motores grandes que poseen una gran inercia y que adquieren velocidad lentamente.

La figura 5-2 representa una descripción gráfica de la variación de la corriente y de la velocidad en el inducido cuando el motor shunt se acelera por etapas, hasta su velocidad nominal.

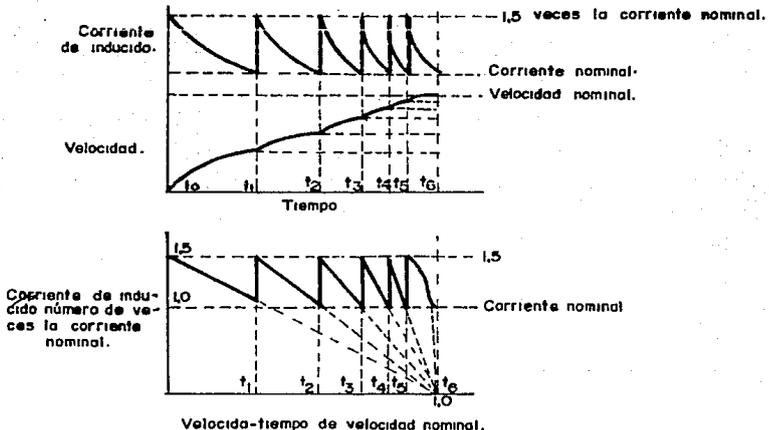


Fig. 5-2 Aceleración de un motor shunt.

Se observará que, debido a que el motor se pone en marcha desde el reposo y a causa de que su inducido posee inercia, el primer contacto de aceleración (punto 1) necesita el mayor espacio de tiempo antes de que la aceleración se haga casi nula y de que la velocidad se aproxime a la determinada en un principio a causa de (1) la reducción de tensión al inducido, (2) la carga aplicada al motor, (3) el flujo de excitación y (4) la f.c.e.m. ( $S = K V a - I_a R_a / \emptyset$ ). Avanzando la maniobra a la segunda posición (punto 2), se reduce la resistencia y suministra una corriente irruptiva del 150 por ciento de la carga nominal (desarrollando un aumento del par para acelerar el motor a la velocidad asintótica más elevada determinada por la nueva tensión en el inducido).

A la vez que la resistencia del inducido se reduce en cada tomo, el motor se acelera pero necesita menos tiempo para poder alcanzar su velocidad asintótica (aceleración nula) y reducir la corriente hasta aproximadamente la carga nominal. Sin embargo, el último contacto puede necesitar algo más de tiempo que los intermedios debido al aumento de carga y de velocidad, como se muestra en la figura 5-2.

Las dos curvas superiores de la fig. 5.2 muestran la corriente y velocidad del inducido, trazadas, respectivamente, en función del tiempo. La curva inferior muestra la corriente del inducido en función de la velocidad nominal. Si, en el contacto 1, el motor se acelera a velocidades más elevadas el aumento de la f.c.e.m. reducirá la corriente del inducido a un valor casi nulo a la velocidad nominal. Esto también es cierto para los otros contactos: pero, en cada uno, la velocidad del motor shunt queda limitada, en último término, por la ecuación ( $S = K V a - I_a R_a / \emptyset$ ), donde  $V a$  representa la diferencia entre la tensión de la red y la caída en la resistencia específica en serie con el inducido.

Aunque las curvas mostradas en la figura 5-2 se refieren a un motor shunt, también son válidas para motores serie y compound, con ligeras modificaciones en la curvatura. El número de etapas de aceleración es aproximadamente función de la potencia útil del motor, en C.V. Los motores más grandes, al poseer mayor inercia, necesitan más contactos y un intervalo de tiempo mayor para aproximarse a una determinada velocidad asintótica.

Los motores muy pequeños, de fracciones de CV, poseen tan poca inercia que no precisan de ningún arrancador; pueden ponerse en marcha a plena tensión, ya que se aceleran y originan una f.c.e.m. (de autoprotección) casi inmediatamente.

### C) ARRANCADOR COMERCIAL DE TRES BORNES

La figura 5-3 muestra el esquema de conexiones de un arrancador manual de tres tomas de corriente que se utiliza para la puesta en marcha de un motor shunt. La figura agrupa cuatro unidades separadas y equipo distinto: (1) el arrancador de tres tomas (2) una caja de interruptores de seguridad con interruptor y protección de corto circuitos y sobrecargas, (3) el motor shunt, con sus circuitos de inducido y de excitación, y (4) un reóstato de campo exterior. El funcionamiento es el mismo que el descrito en la sección precedente. Obsérvese que, en el punto 1 del arrancador de la fig. 5-3, la tensión de -

plena excitación se aplica al campo a través de una bobina de retención. Cuando el brazo de arranque llega al último contacto (punto 6) la corriente en el circuito de excitación (a través de la pequeña resistencia de arranque, de la bobina de retención, del restato de campo, y del devanado de excitación) produce la suficiente f.m.m. en la bobina de retención, para mantener la armadura del electroimán del hierro dulce del brazo de arranque atraída magnéticamente en esta posición venciendo la tensión en sentido contrario del resorte de reposición en espiral.

La bobina de retención y el resorte sirven para proporcionar (1) protección contra campo abierto o debilitado, y (2) protección de mínima tensión.

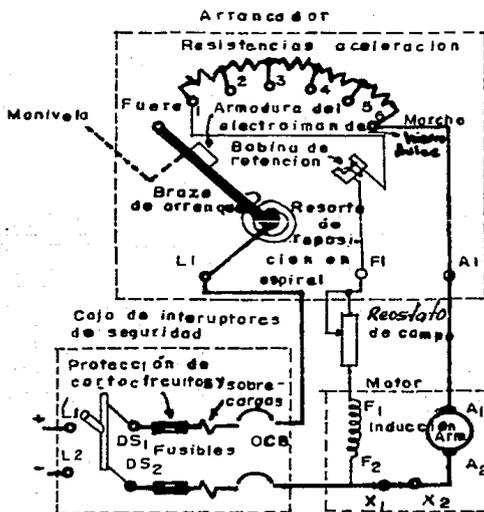


Fig. 5.3 Arrancador manual de tres bornes para un motor shunt.

En el caso de una situación cualquiera de ambas, la tensión del resorte antagonista (que normalmente se puede ajustar), es suficiente para desenganchar el brazo de arranque y devolverlo a su posición de FUERA. El arrancador de tres bornes puede utilizarse también en un motor compound; la conexión serie de la excitación puede hacerse en los puntos X1 - X2 del motor, como se muestra en la figura 5-3.

El motor puede detenerse por una cualquiera de las siguientes circunstancias: (1) la apertura del interruptor de la línea principal DPST; (2) un corto circuito (el fusible principal que abre el circuito) en el circuito del inducido o de excitación, incluyendo al arrancador; (3) una sobrecarga en el circuito del inducido (haciendo funcionar los disyuntores de sobrecarga OCBs); (4) un circuito de campo débil o abierto; o (5) una disminución de la tensión de la línea. Como se muestra en la figura 5-3, el objeto principal de la bobina de retención es el de mantener el motor conectado a la red, y a la vez proporcionar protección de mínima tensión y campo débil. El esquema simplificado que se muestra en la figura 5-4a, es una representación esquemática del arrancador comercial de tres bornes; como se indica, el arrancador consta de dos circuitos en paralelo. Previamente se señalará que la ventaja de la protección de campo abierto se convierte en inconveniente cuando el motor está cargado y se desean mayores velocidades. Para poder obtener mayores velocidades, es necesario debilitar la corriente de excitación y el flujo (por aumento de la resistencia del reostato regulador del campo). Sin embargo, siempre que se reduce la corriente de excitación, el brazo de arranque se desengancha y el motor se para.

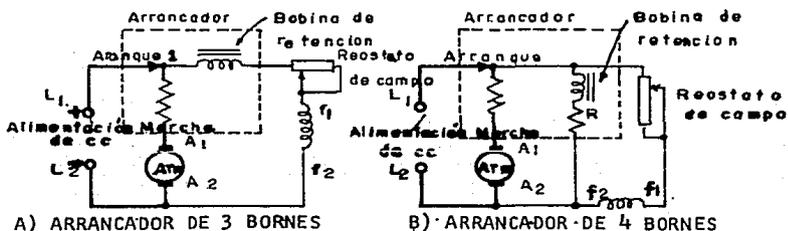


Fig. 5-4 Esquemas simplificados de arrancadores de tres y de cuatro bornes.

Frecuentes e inesperadas paradas de esta índole en el funcionamiento, condujeron al arrancador de cuatro bornes mostrado en forma esquemática en la figura 5-4b.

El arrancador de cuatro bornes se diferencia del de tres en que la disposición de 4 tomas habilita tres vfas en paralelo en bornes de la fuente de alimentación en vez de dos. La vfa adicional en paralelo está formada por el circuito separado de la bobina de retención, en serie con una resistencia de protección R. La resistencia puede ser del tipo de tomas o semivariable para equilibrar la tensión del resorte de reposición en espiral.

#### D) ARRANCADOR COMERCIAL DE CUATRO BORNES.

El arrancador comercial de cuatro tomas de corriente, en el que se necesita un cuarto terminal para el circuito de la bobina de retención, mostrado en la figura 5-5 y 5-4b, permite variar la

corriente en el circuito de excitación con independencia del circuito de la bobina de retención. Claro está que ello representa la ventaja más grande del arrancador de cuatro bornes, pero esta ventaja contribuye a tres inconvenientes:

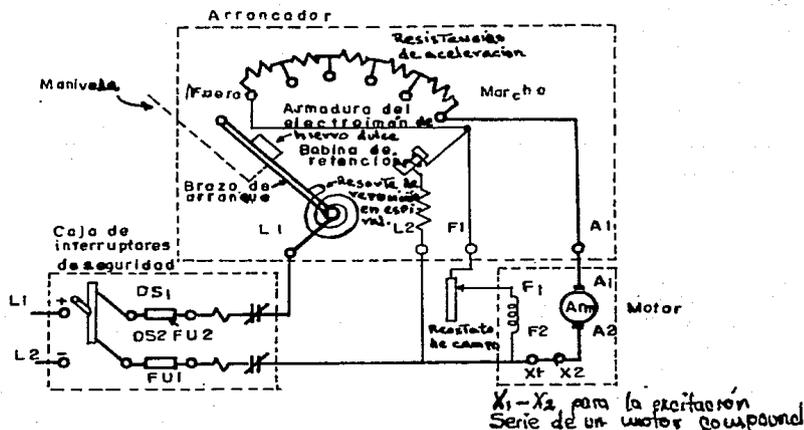


Fig. 5-5 Arrancador manual de cuatro bornes para un motor shunt o compound.

1.- Si el campo se debilita considerablemente o queda abierto accidentalmente, el motor se embalará a velocidades peligrosas; contra el exceso de velocidad, en la industria suelen usarse dispositivos de protección auxiliares, tales como circuitos centrífugos.

2.- Para poder aumentar la velocidad cuando el motor acciona una carga fuerte, la corriente de excitación queda debilitada; si el motor vuelve a arrancar entonces, hace que la carga se acelere demasiado rápida y peligrosamente (la corriente del inducido se incrementa para compensar el flujo de excitación debilitado de acuerdo con la teoría de la dinamo de doble excitación).

3.- El aumento de la corriente de inducido pueda continuar llegando a disparar los dispositivos de protección de sobrecargas, e incluso de cortocircuito, hasta que se haya reducido la resistencia del reóstato de campo.

Los dos último inconvenientes se salvan incorporando una disposición de memoria automática en el interior del arrancador de cuatro bornes, como se muestra en la figura 5.6.. El reóstato de campo va montado directamente en el arrancador, y cuando la bobina de retención suelta el brazo de arranque (como resultado de una baja tensión o de la apertura del interruptor de desconexión de la línea), es

te reposa automáticamente la manivela del reóstato de campo a la posición de FUERA.

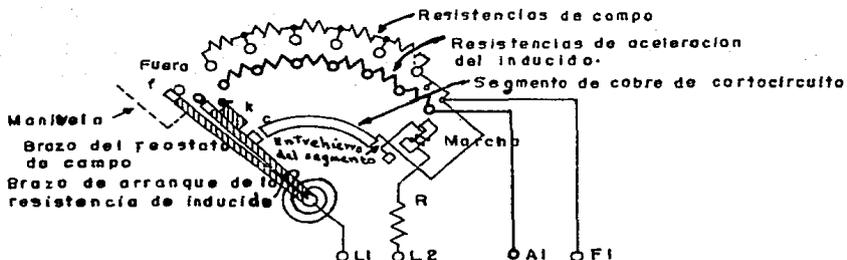


Fig. 5.6 Arrancador manual de cuatro bornes para un motor shunt o compound con reóstato de campo de regulación de la velocidad incorporado.

El funcionamiento del arrancador es como sigue:

1.- La manivela mueve el brazo del reóstato de campo (contacto f) y el de arranque de la resistencia del inducido (contacto a y c) de la posición de FUERA al contacto de la primera resistencia de inducido, en esta posición toda la resistencia del reóstato de campo está derivado por el contacto c del inducido, conectado por medio de un segmento de cobre de cortocircuito de terminal  $F_1$  y el motor arranca a plena corriente de excitación.

2.- El contacto a del brazo de arranque del inducido proporciona una resistencia de inducido máximo en el arranque.

3.- La resistencia de arranque del inducido se reduce de manera normal hasta que se alcanza la última posición o de MARCHA salvando el entrehierro del segmento de cobre de cortocircuito. En la posición de MARCHA sólo queda retenido al brazo de la resistencia de inducido por su armadura, K, y por la bobina de retención; el brazo de la resistencia de campo es libre de moverse por medio de la manivela.

4.- Por tanto, la manivela sirve para poner en marcha el motor y controlar el ajuste de la resistencia del reóstato de campo situando el contacto F del brazo en la posición correspondiente al incremento de velocidad deseado por encima de la básica (corriente a plena excitación).

5.- En el caso de baja tensión o de la apertura del interruptor de desconexión de la línea, el brazo de la resistencia de arranque del inducido es desenganchado por la bobina de retención, vuelven

do de nuevo los dos brazos a la posición de FUERA.

El arrancador de cuatro bornes (fig. 5.6) con un reóstato de campo de ajuste de la velocidad incorporado (denominado a veces arrancador compound de cuatro bornes o regulador manual de la velocidad de cuatro bornes) presenta las ventajas de (1) arranque del motor siempre a corriente de plena excitación y (2) eliminación de la necesidad de un reóstato de campo externo separado, ya que puede utilizarse tanto para el arranque como para el ajuste de velocidad mediante control del reóstato de campo.

Sin embargo, todavía tiene el inconveniente de no presentar protección de campo abierto o débil. Otro inconveniente es que, debido a que el brazo puede no estar en su posición de MARCHA habitual, siempre en el sentido de las agujas del reloj, existe la tentación de parar el motor por retorno de la manivela a su posición de FUERA en sentido contrario a las agujas del reloj. Esto es muy peligroso porque, durante el proceso el campo se debilita continuamente y el motor se acelera.

Ninguna clase de arrancador, incluyendo el descrito anteriormente, debe llevarse a la posición de paro =retirando= manualmente el brazo de su posición de MARCHA. En los arrancadores mostrados en las figuras 5.3 a 5.7, tal proceder podría originar el desgaste de los contactos de arranque (grupo 1) cuando se interrumpen la fuerte corriente de inducido y los circuitos de excitación altamente inductivos.

Además, el arrancador de la figura 5.6 podría dar origen a altas velocidades peligrosas.

La manera adecuada de parar un motor es desconectar sus terminales de líneas L1-L2, de la fuente de suministro, utilizando un interruptor de desconexión.

El brazo será devuelto automáticamente a su posición de FUERA .

#### E) ARRANCADORES MANUALES DE MOTORES SERIE

Un motor serie es, fundamentalmente, un circuito de dos terminales o de dos tomas. Los arrancadores comerciales de tres y de cuatro bornes anteriormente descritos se utilizan en motores shunt y compound, indistintamente, para la misma corriente de arranque o la misma potencia nominal.

Se necesitan modificaciones especiales para los arrancadores de un motor serie. La figura 5.7a, muestra un arrancador manual de dos bornes de un motor serie en el que la bobina de retención (de unas cuantas vueltas de hilo grueso) va conectada en serie con la excitación serie y el inducido. Durante el período de arranque y de marcha, un motor serie cargado tendrá la corriente de inducido suficiente para excitar la bobina de retención lo necesario para retener el brazo del arrancador en posición de Marcha, en el caso de anulación de la carga o reducción de la misma hasta el punto en que se desarrolle peligrosamente una elevada velocidad, la reducción de la corriente de inducido es suficiente para debilitar la bobina de reten-

ción y soltar el brazo de arranque.

Las dos ventajas del arrancador manual de dos bornes, de disparo en vacío, de un motor serie son (1) protección contra el exceso de velocidad en el caso de eliminación o reducción de la carga, y (2) protección de mínima tensión.

En aplicaciones que implican control de la velocidad, donde la carga está acoplada al motor de tal forma que no puede ser eliminada (como en el servicio de tracción de ferrocarriles, por ejemplo), la carga del motor puede reducirse (a altas velocidades) lo suficiente para desconectar el motor, utilizando el arrancador del tipo de disparo en vacío. El arrancador de la figura 5.7b, el arrancador manual en serie de disparo a mínima tensión de tres bornes, se utiliza donde no existe la posibilidad de embalamiento accidental debido a una pérdida de carga.

Este arrancador es al motor serie lo que el arrancador de cuatro tomas lo es a los motores shunt y compound. Se disponen tres terminales, L1, L2 y S1. Ello proporciona sólo la protección de mínima tensión y no protege al motor en el caso de campo débil. Generalmente, se emplean junto a dicho arrancador los dispositivos de protección centrífugos contra el exceso de velocidad. Una resistencia variable de protección, R, se conecta en serie con la bobina de retención (de muchas vueltas de hilo fino) a plena tensión para ajustar el disparo del brazo de arranque.

Se observará que este arrancador serie de mínima tensión de tres tomas (con los terminales L1, L2, S1), no es intercambiable con el otro de tres tomas (con los terminales L1, F1, A1), porque el primero tiene una resistencia de protección bastante elevada que originaría una débil corriente de excitación para el motor shunt o compound. No obstante a veces es posible cortocircuitar esta resistencia y, volviendo a notar los terminales, se modifica el arrancador para funcionar como shunt o compound. De la misma forma, sacando el terminal de campo, F1, el arrancador de la figura 5.7b puede convertirse en uno de cuatro tomas (fig. 5.5) con una modificación relativamente pequeña. Esto simplifica las partes que se necesitan para la fabricación de arrancadores de una determinada potencia.

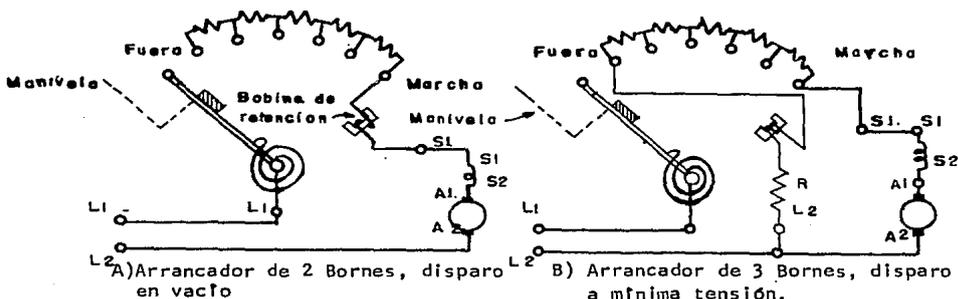


Fig. 5.7 Arrancadores manuales para motor serie.

## F) REGULADOR MANUAL DE TAMBOR

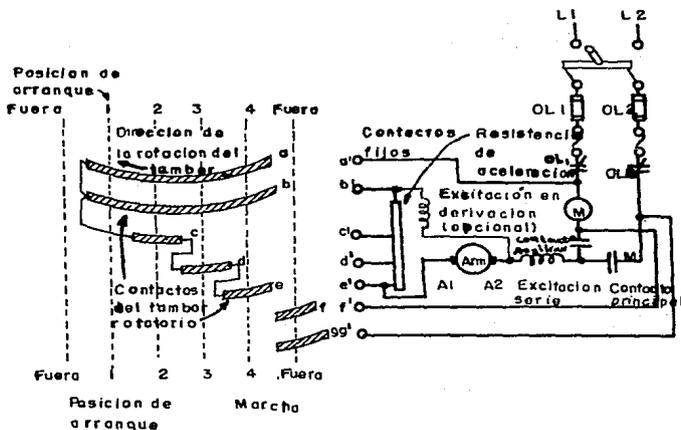
Todos los arrancadores manuales planos (de chapa frontal) descritos anteriormente poseen ciertos inconvenientes eléctricos y mecánicos cuando se utilizan en motores shunt, compound o serie de gran potencia. Es difícil construir la protección contra formación del arco y de extinción para estos arrancadores, y la naturaleza de los contactos deslizantes planos (cursores planos) con entrehierro entre ellos se traduce en desgaste de los contactos en el arranque de los motores más grandes.

Estos inconvenientes se salvan con un =regulador= de tambor - de tipo rotativo, que tiene un conjunto de gruesos conductores circulares de cobre laminares giratorios, aislados uno del otro y colocados verticalmente como se muestra en la figura 5.8. La figura representa un desarrollo de los contactos, en  $360^\circ$ , que se hacen girar mediante una manivela situada en la parte superior (que no aparece en la figura). Un grupo de frotadores fijos y con resortes a  $a'$  a  $g'$  mostrados en la figura 5.8b, separados por sumideros de arco y equipados con protección magnética de extinción, está colocado vertical y concéntricamente con los contactos móviles. La longitud de los segmentos de los contactos móviles, puede variarse para ajustar a la deseada secuencia de funcionamiento prefijada, y la presión de los frotadores fijos también puede ajustarse. Además, esta construcción proporciona una gran flexibilidad en el =gobierno= de la potencia eléctrica de una forma prefijada para el arranque y control de la velocidad de un motor.

El regulador sencillo de tambor inversible de la figura 5.8 - se utiliza en esta aplicación para el arranque de un motor serie; también puede usarse para motores shunt y compound, como se indica en la figura 5.8b. Una resistencia de tomas de aceleración proporciona 3 etapas de aceleración. Cuando los contactos del tambor rotatorio se hacen girar a 1 en la fig. 5.8 a, los contactos  $a'$  y  $b'$  quedan cortocircuitados, y el motor arranca a plena resistencia en serie del inducido. Después de un intervalo de tiempo adecuado, cuando el operario hace girar el tambor a la posición 2, los contactos  $a'$ ,  $b'$  y  $c'$ , quedan cortocircuitados, reduciendo la resistencia en serie del inducido a las dos terceras partes de su valor y acelerando el motor a mayor velocidad, después de otro intervalo adecuado, el operario hace girar el tambor a la posición 3, donde se cortocircuitan los contactos  $d'$ ,  $b'$  y  $a'$ , manteniendo un contacto directo de  $L1$  a  $d'$  y reduciendo la resistencia en serie del inducido a un tercio de su valor total. Finalmente después de un tercer intervalo adecuado, se hace girar el tambor a la posición 4 (MARCHA) donde quedan cortocircuitados los contactos  $a'$ ,  $b'$  y  $e'$ , por lo que se cortocircuita toda la resistencia en serie y se coloca el motor serie a plena tensión.

Se observará que existen dos grupos de segmentos comunes o en cortocircuito en el tambor giratorio: los segmentos de  $a$  y  $e$  y los  $f, g$ . El primer grupo sirve para disminuir la resistencia en serie del inducido progresivamente y conectar el motor a la red. El segundo grupo sirve para alimentar el relé contactor principal  $M$  y sus contactos principales y auxiliares de la figura 5.8b en la posición de FUERA. Por tanto, el relé  $M$  se autoalimenta en todas las posiciones a través de su contacto auxiliar  $M$ . Cuando el tambor está en una de las posiciones de arranque o en la posición de MARCHA (posición 1 a 4 respectivamente), el relé  $M$  (1) servirá como protección de mínima ten-

sión, ya que está en paralelo con el circuito del inducido a plena tensión, y (2) hará volver el tambor a la posición de FUERA para poner en marcha de nuevo el motor en el caso de una parada del mismo por una cualquiera de las siguientes causas.



A) Segmentos de Contactos del Tambor rotatorio (desarrollo en 360°)    B) Esquema simplificado del Regulador

Fig. 5.8 Regulador manual de tambor (con protección de sobre cargas, cortocircuitos, y de mínima tensión) para el arranque de un motor serie.

El motor se parará bajo una de las siguientes condiciones: (1) apertura del interruptor principal de línea, (2) una disminución de la tensión activa suficiente para desexcitar el relé M, (3) una sobrecarga suficiente para hacer que disparen los contactos normalmente cerrados de los relés OL1 y OL2, (4) un cortocircuito bien en el circuito de relés de control, bien en el regulador de tambor, o en el circuito del motor, haciendo que los fusibles abran el circuito; o (5) una apertura en el circuito de campo shunt (de trazo fino) de un motor compoun o shunt que utiliza este regulador.

Si la resistencia que se utiliza en serie con el inducido, del motor es de variación continúa en vez de intermitente, el regulador de tambor puede servir como medio de control de la velocidad por resistencia del inducido, así como de arrancador manual de un motor de c.c., y la manivela del tambor puede ser dejada de manera continúa en cualquiera de las posiciones de 1 a 4.

Alguna de las ventajas de los reguladores de tambor son las siguientes:

1.- Son relativamente económicos, en los tamaños pequeños y mediano, en comparación con los arrancadores automáticos.

2.- Son de formato bastante compacto, pero las resistencias de arranque o de control de la velocidad deben ser colocadas aparte y externamente.

3.- El tambor está completamente protegido y, si es necesario, puede fabricarse hermético, impermeable, o a prueba de explosiones.

4.- Se maneja es muy sencillo.

5.- Son mecánicamente muy simples y robustos.

6.- Puede evitarse una aceleración demasiado rápida mediante inclusión de mecanismos retardadores.

7.- Eléctricamente, son de gran versatilidad, porque pueden realizarse conexiones internas relativamente complejas para permitir la inversión, el frenado y otras operaciones de control de la velocidad.

Un perfeccionamiento del regulador de tambor es el regulador de levas. La única diferencia esencial entre el regulador de tambor y el de levas está en la forma en que se realiza el contacto. En apariencia y funcionamiento son idénticos.

En el regulador de levas, el cilindro rotatorio que lleva los contactos móviles se reemplaza por un grupo de estratos (o "cubiertas") de levas aisladas que abren y cierran los grupos de contactos fijos. El regulador de levas aventaja al de tambor en que (1) sus contactos son relativamente simples para la conservación y el reemplazamiento, (2) se pueden crear rápidamente nuevas secuencias de conexión, Por reemplazamiento de las levas o puentes, y (3) se pueden diseñar contactos fijos para la apertura y el cierre rápidos, que no es posible con los reguladores de tambor.

Los reguladores de tambor más pequeños con accionamiento de levas, a veces se denominan disyuntores principales. En realidad, tanto el regulador de tambor como el de levas son interruptores, de contactos grandes, múltiples y multipolares. Por tanto, los disyuntores principales pueden ser los tipos planos, de tambor o con accionamiento de levas, y generalmente tienen menos polos que los reguladores más grandes de tambor y de levas. Sin embargo a uno le costaría distinguir entre un regulador pequeño de tambor o de levas y un disyuntor principal grande con accionamiento de tambor o de levas.

## V. 2.- ARRANCADORES AUTOMÁTICOS DE C.C.

### A) GENERALIDADES.

Los arrancadores automáticos están proyectados para realizar las mismas funciones que los manuales cuando se gobiernan, por uno o más pulsadores de contactos momentáneos o interruptores de arranque manuales, accionados a distancia o localmente. En general, se puede

afirmar que los arrancadores automáticos salvan las limitaciones de los manuales en cuanto:

1.- Los arrancadores automáticos no cansarán a un operario durante los ciclos frecuentes de arranque-parada y, por tanto, esté se inclinará por parar el motor cuando no esté en servicio, reduciendo la carga eléctrica.

2.- Los arrancadores automáticos no están tan limitados en magnitud física como lo están los manuales, por la fuerza humana que se necesita para su manejo en la secuencia de conexión.

3.- Tanto el operario como las unidades de contactos momentáneos de control pueden estar separados del arrancador por lo que queda protegido por intervenir a distancia.

4.- Las pequeñas unidades de pulsadores son más fácilmente situables en espacios confinados accesibles que los arrancadores de tambores o de levas.

5.- Existe menor peligro de ruptura interna y menos necesidad de ventilación interior en los arrancadores automáticos.

6.- Los errores humanos quedan eliminados y el motor puede ponerse en marcha por un operario inexperto en un mínimo espacio de tiempo.

Como en todos los dispositivos automáticos, existen dos clases generales de funcionamiento: "en bucle abierto" y en "Bucle cerrado". El control en bucle abierto gobierna la potencia de un motor de una forma prefijada, con independencia del funcionamiento del motor.- El control en bucle cerrado gobierna la potencia de un motor de una forma predeterminada que depende en parte del funcionamiento del motor..

Los arrancadores automáticos de c.c. del tipo en bucle abierto se clasifican como arrancadores de aceleración de tiempo fijo, y aquellos del tipo en bucle cerrado como arrancadores de aceleración por limitación de la corriente, el espacio no nos permite un examen completo de todos los diversos principios o procedimientos empleados en cada clase de funcionamiento. No obstante, a título de ejemplo, se presentarán algunos de cada clase, empezando por los arrancadores en bucle abierto de aceleración por retraso.

#### B) ARRANCADOR DE ACELERACION DE TIEMPO FIJO, DE C.C., QUE UTILIZA CONTACTORES DE ACCION RETARDADA.

Un contactor de acción retardada es un relé inductivo ordinario con un manguito de cobre o de latón inserto en su núcleo. El efecto del manguito antimagnético hace que el relé funcione como un relé magnético instantáneo bajo condiciones de régimen permanente, pero como un relé de acción retardada, cuando circule una corriente transitoria por la bobina del relé. Por tanto para los contactos normalmente cerrados del relé de la figura 5.9, una corriente en aumento en la bobina del contactor producirá un retraso al abrir los contactos 1A, 2A, y 3A, respectivamente, y una corriente en disminución producirá un re-

tardo al cerrar los mismos contactos. Este retraso es debido a la - creación de una fuerza contranagnetomotriz debida a las corrientes de Foucault inducidas en el manguito en sentido contrario a la corriente en aumento o disminución, en concordancia con la ley de Lenz.

El arrancador de la figura 5.9 funciona de la siguiente manera:

1.- Se pulsa el botón de ARRANQUE de contacto momentáneo y - se mantiene así lo suficiente para permitir que los contactores M, 1A 2A y 3A, hagan funcionar sus respectivos contactos n.a. y n.c. Un - temporizador mecánico T, acoplado a pulsador, activa una alarma que - indica cuando puede soltarse el botón. Al soltar el botón de ARRANQUE se reconecta el temporizador.

2.- Cuando se ha soltado el botón de ARRANQUE, todos los - relés quedan excitados. El relé M en la línea de control 4 queda excitado por medio del contacto auxiliar M, en paralelo con el botón de ARRANQUE, con su contacto de enclavamiento M derivando el contacto 3A. El relé M se desexcitará en el caso de (a) baja tensión; (b) anulación del campo; (c) sobrecarga; (d) pulsando el botón de PARO; (e) un fusible fundido en el circuito de línea del motor; o (f) un fusible fundido en el circuito de control.

3.- El motor arranca a plena resistencia de arranque en serie con el inducido y a plena corriente de excitación, puesto que el relé 3A está excitado.

4.- El contactor de retraso 1A en la línea de control 1, desexcitado por el contacto del relé M, produce un retraso específico en sentido opuesto a la disminución de corriente en su bobina y, por último, vuelve al reposo, restableciendo sus contactos abiertos a la - condición de n.c. El motor se acelera a mayor velocidad, por la reducción de la resistencia en serie al quedar los contactos 1A cortocircuitados.

5.- Simultáneamente al cierre de los contactos 1A de la resistencia en serie, el contactor de retraso 2A queda desexcitado en la línea de control 2 debido a la apertura de los contactos 1A de ésta. - Después de un retraso específico, la bobina 2A =abre=, cortocircuitando la resistencia adicional en serie con el inducido y desconectando la línea de control 3. El motor se acelera a mayor velocidad debido a la reducción de la resistencia en serie al quedar los contactos 1A y 2A cortocircuitados.

6.- A la vez que ocurre el cierre de los contactos 2A en bobinas de la resistencia en serie, se abren los contactos 2A en la línea de control 3, desexcitando la bobina de retraso 3A. Después de un retraso específico, la bobina 3A =abre= cortocircuitando el resto de la resistencia en serie con el inducido, desconectando el acoplamiento 3A de la línea de control 4, y también el reostato de campo para permitir que la velocidad aumente al valor deseado de ajuste. (Este último es, de hecho, un quinto punto de aceleración del motor).

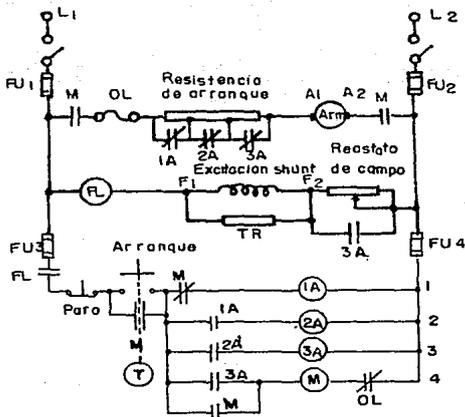


Fig. 5.9 Arrancador de aceleración, de tiempo fijo, de c.c., empleando contactores de acción retardada.

El arrancador automático de la fig. 5.9, emplea una sola unidad de ARRANQUE y una de PARO. Pueden añadirse otras unidades de - - arranque a distancia (a esté y a todos los demás arrancadores de cualquier tipo) en paralelo con el pulsador de arranque y pueden incluirse otras unidades de PARO a distancia en serie con el pulsador de - - PARO en la línea de control 1. La resistencia de tirite TR absorbe la energía del campo siempre que el motor esté desconectado de la - - fuente de alimentación de c.c.. y sin excitación.

#### C) ARRANCADOR DE ACELERACION POR TIEMPO FIJO DE C.C. QUE UTILIZA RELES DE AMORTIGUADOR

El arrancador mostrado en la figura 5.10 funciona de la siguiente manera:

1.- Pulsando el botón de ARRANQUE se excita la bobina M y - cierra todos los contactos M n.a. El motor arranca a plena tensión - con toda la resistencia en serie con el inducido y a plena corriente - de excitación, porque el contacto 3A n.c. deriva el reóstato de campo.

2.- El relé de amortiguador inductivo de acción retardada, -  $TD_1$ , también es excitado - simultáneamente a través de los contactos - M y de los contactos del relé desexcitado 3A. Después de un adecuado - retardo, el  $TD_1$ , cierra sus contactos n.a., excitando simultáneamente -



Se observará que, aunque 1A y 2A estén desexcitados, toda la resistencia en serie del inducido está derivada por los contactos 3A. A la vez que dispone de un quinto contacto de aceleración cuando los contactos n.c. 3A, en bornas del redstato de campo, quedan abiertos, y el motor alcanza su velocidad final establecida. El arrancador de c.c. de la figura 5.10 tiene la ventaja de (1) el retardo es ajustable mediante el uso de relés de amortiguador, (2) todos los relés de acción retardada están desexcitados durante el período de MARCHA y pueden ser de funcionamiento intermitente y (3) un mínimo número de relés está excitado en el período de MARCHA para así ahorrar energía y reducir el calentamiento en el interior del arrancador. Los arrancadores que utilizan la misma secuencia de contacto que la figura - - 5.10 también son factibles empleando relés que tengan mecanismos de escape, de palanca, de amortiguador o de retardo, cámaras neumáticas, imanes permanentes, etc., para habilitar el retardo necesario de aceleración en tiempo fijo (véase sección D).

D) ARRANCADOR DE ACELERACION POR TIEMPO FIJO, DE C.C., QUE UTILIZA UN TEMPORIZADOR MOTORIZADO O UN MECANISMO DE - - TIEMPO.

Un solo relé temporizado o de acción retardada que tenga contacto secuenciales múltiples pueda utilizarse para habilitar la secuencia de aceleración de tiempo fijo que se precisa para acelerar el motor. El arrancador de la figura 5.11 emplea un temporizador motorizado (un motor síncrono temporizado, de poca velocidad, que tiene con tactos de tiempo afianzados a un tambor aislado) para cerrar los contactos TM1, TM2, TM3, respectivamente en una secuencia predeterminada.

Estos contactos excitan los relés de control n.a. 1A, 2A y - 3A, respectivamente, en la misma secuencia con adecuados retardos entre cada uno de ellos. También se utilizan péndulos accionados eléctricamente, solenoides, mecanismos de escape de palanca y de volante y temporizadores neumáticos para realizar una secuencia prefijada de 1A, 2A y 3A, de manera análoga.

Sin embargo, todos los mecanismos de tiempo, sin distinción alguna, necesitan un método de reconexión automática ya que la secuencia podría interrumpirse temporalmente a causa de una interrupción de energía. En algunos temporizadores mecánicos, los contactos de la armadura se devuelven a su posición original de ARRANQUE mediante pasas o resortes. En los otros casos, como en el del motor temporizado de la figura 5.11, los contactos normal cerrados TM<sub>5</sub> y M, en serie con dicho temporizador TM, permiten devolver el mecanismo temporizador a su posición de arranque (cuando la potencia queda restablecida) y funcionar hasta que abre su contacto TM<sub>5</sub>. Por tanto, el motor temporizado es capaz de funcionar durante su secuencia y volver a la posición de arranque, cuando la potencia se vuelve a aplicar, independientemente del botón de arranque n.a.

No obstante, ya que la bobina de M no está excitada, el cierre de los contactos 1A, 2A y 3A durante el período no afecta al arranque o no produce efecto alguno. Sin embargo a causa del tiempo de reconexión interpuesto, no se pueden admitir paradas y arranques rápidos

(cierres y aperturas sucesivos) si se aplica este tipo de arrancador.

Las secuencias de tiempo del motor temporizado pueden ajustarse, como en todos los mecanismos temporizados, y ésta resulta una ventaja prominente de este tipo de arrancador.

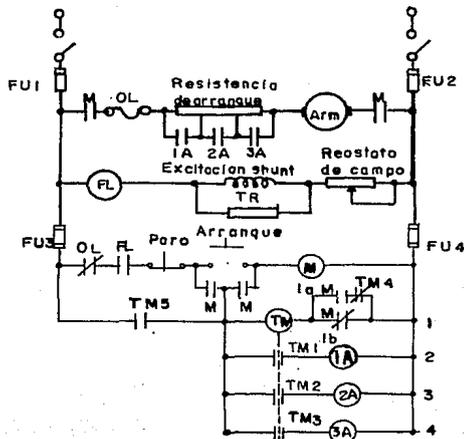


Fig. 5.11 Arrancador de aceleración de tiempo fijo, de c.c., de temporizador motorizado (también de péndulo o escape de volante).

El arrancador mostrado en la figura 5.11 funciona así:

- 1.- El botón de arranque cierra los contactos M, n.a., cuando es excitado el relé M.
- 2.- El motor temporizado, TM, empieza a girar cuando está excitado a través de  $TM_4$ , n.c. de la línea 1A y los contactos M que shuntan el botón de arranque, cerrando  $TM_5$ .  $TM_5$  se cierra de esta forma y permanece así hasta el punto 7.
- 3.- El temporizador del motor funciona cerrando  $TM_1$ ,  $TM_2$  y  $TM_3$  sucesivamente. Estos aceleran el motor mediante la excitación de los relés 1A, 2A y 3A, por turno, como está previsto por el temporizador. Cuando 3A cierra, el motor va en marcha a plena tensión.
- 4.- El motor temporizado, TM se para cuando el  $TM_4$ , n.c. es activado, desconectando la línea 1a.

5.- Con el motor en marcha a plena tensión, todos los contactos TM del motor temporizado hallan en estado excitado.

6.- Cuando se pulsa el botón de PARO, el relé M se desexcita y el motor se para.

7.- Pero ahora el motor temporizado es excitado a través de los contactos n.a.  $TM_5$  y M.n.c. en la línea 1B. El motor continúa funcionando, abriendo simultáneamente  $TM_1$  a través de  $TM_3$  y  $TM_5$  y cerrando simultáneamente  $TM_4$ .

8.- Cuando  $TM_5$  es abierto, el motor temporizado se para y ahora los contactos están completamente reciclados y dispuestos para acelerar de nuevo el motor.

9.- Obsérvese que en el caso de sobre carga, anulación del campo, o apertura del interruptor principal, sea cuando sea, durante y después de la secuencia de aceleración, el motor temporizado continúa en marcha debido al  $TM_5$  n.a. (cerrado en la etapa 2) y la línea 1b, hasta que todos los contactos estén reconectados y se abra  $TM_5$  (etapas 7 y 8). Esto ocurre inmediatamente en el caso de interrupción de energía hasta que esta queda restablecida.

E) ARRANCADOR DE ACELERACION POR TIEMPO DEFINIDO, DE C.C., QUE UTILIZA CONSTANTE DE TIEMPO INDUCTIVA DE RELES DE BOBINA DE RETENCION.

La figura 5.12 muestra un arrancador que utiliza relés diferenciales, que consiste en dos bobinas arrolladas a un núcleo común de relé. Además del contacto principal M, se emplean tres relés, cada uno con un devanado inductivo HC (bobina de retención), que actúan oponiéndose al devanado de la bobina de cierre AC que tiende a cerrar los contactos 1A, 2A y 3A, respectivamente. Estas bobinas de retención 1HC, 2 HC y 3 HC tienden a mantener los contactos n.a. 1A, 2A y 3A en posición abierta mientras estas bobinas permanezcan excitadas.

El arrancador de la figura 5.12 funciona de la siguiente manera:

1.- Pulsando el botón de ARRANQUE se excita el contactor de línea M y la bobina de cierre 1AC, 2AC y 3AC. Pero como que 1HC estaba excitada incluso antes de que se pulsara el botón de arranque, el contacto n.a. 1A permanece abierto. La corriente en el arranque mediante la resistencia de arranque, también excita 2HC, manteniendo asimismo el contacto 2A, n.a. abierto. Por consiguiente, el motor arranca con la máxima resistencia en serie del inducido a plena tensión.

2.- El botón de ARRANQUE y el contacto de enclavamiento n.a. M cortocircuitan la bobina de retención 1HC, y la corriente disminuye en dicho relé de acuerdo con su constante de tiempo inductiva. Cuando esta corriente es lo bastante pequeña, el contacto 1A, n.a. se cierra como resultado de la f.m.m. del relé 1AC. El motor se acelera a mayor velocidad con el 1A cerrado.

3.- La bobina de retención 2HC, cortocircuitada por el contacto cerrado 1A, sufre una disminución exponencial y, por fin, se cierra el contacto 2A, acelerando el motor de nuevo.

4.- La bobina de retención 3HC, cortocircuitada por el contacto cerrado 2A, sufre una disminución exponencial y, después de un periodo de tiempo, el contacto 3A se cierra y el motor se acelera a la velocidad deseada, que se ha determinado mediante el ajuste del reostato de campo cuando se abre el contacto n.c. 3A, que lo deriva.

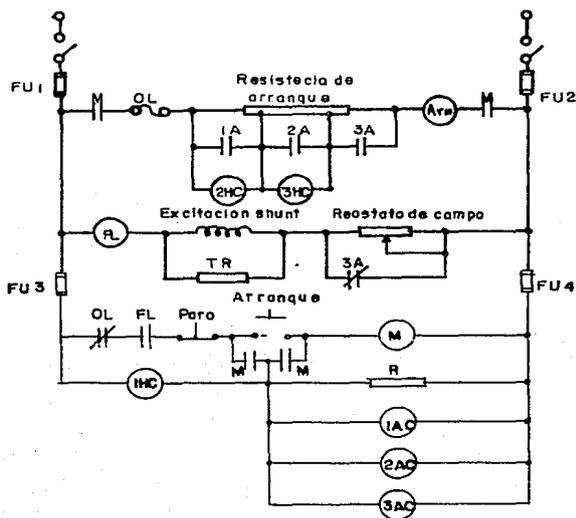


Fig. 5.12 Arrancador de aceleración de tiempo definido de c.c., empleando constante de tiempo inductiva de bobinas de retención.

Este arrancador presenta el inconveniente de que necesita que los relés  $M_1$ , 1AC, 2AC y 3AC estén siempre excitados. Por otro lado, los relés diferenciales de bobinas de retención pueden proyectarse con entrehierros muy pequeños, que originarán f.m.m.s. fuertes en comparación con los relés de amortiguador de acción retardada, por lo que las bobinas de los relés diferenciales de la figura 5.12 no necesitan

tanta corriente. Sin embargo, un segundo inconveniente de este arrancador está en que el tiempo de cierre depende de la constante de tiempo inductiva de las bobinas de retención HC y no es de fácil ajuste. Tanto si son susceptibles de ajuste como si no, el único y mayor inconveniente de los cinco arrancadores de aceleración de tiempo fijo, descritos en las secciones A a la E, está en que la secuencia temporizada es completamente independiente de la corriente de carga de la velocidad del motor. Por tanto, si el motor está muy cargado, puede ser acelerado demasiado rápidamente por medio de un arrancador de tiempo definido. Análogamente, si la carga es muy ligera o marcha en vacío, el motor puede ser acelerado demasiado lentamente, malgastando un considerable tiempo de producción. No existe retroacción debido a la naturaleza de bucle abierto de los dispositivos de control descritos. Este inconveniente queda paliado mediante los dispositivos de aceleración por limitación de la corriente en bucle cerrado descritos a renglón seguido.

F) ARRANCADOR DE ACELERACION POR LIMITACION DE LA CORRIENTE DE C.C., QUE UTILIZA RELES DE F.C.E.M. (METODO POR LIMITACION DE LA VELOCIDAD)

El principio del control en bucle cerrado está en proporcionar una realimentación desde el circuito de potencia o de la red al circuito de control. Como se muestra en la figura 5.13 ello se efectúa por medio de relés sensibles V1, V2, V3, conectados en paralelo con el inducido, cuyos contactos n.a. V1, V2, V3, controlan la secuencia de los relés de las líneas de mando 2, 3 y 4 mostradas en la figura 5.13. Por tanto, la diferencia esencial entre el método de control mediante arrancador en bucle abierto y en bucle cerrado está en que el primero utiliza una secuencia prefijada del circuito de control para introducir variaciones en el circuito de potencia, mientras que el último emplea sensores en el propio circuito de potencia para introducir una respuesta en el circuito de control. Este, a su vez, produce o introduce una variación en la secuencia del circuito de control.

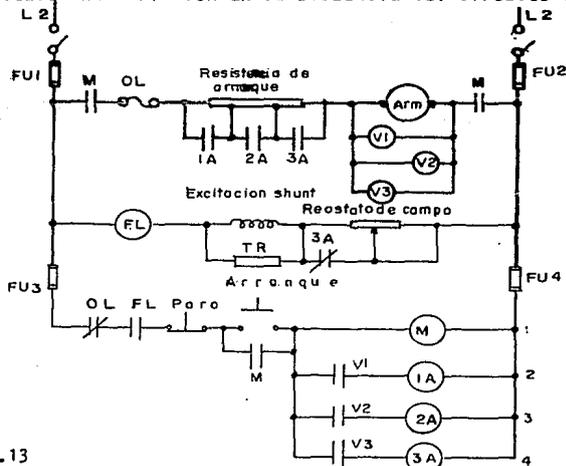


Fig. 5.13

Fig. 5.13 Arrancador de aceleración por limitación de la corriente de c.c., empleando relés de f.c.e.m. (Método de limitación de la velocidad).

1.- Pulsando el botón de ARRANQUE, se pone en marcha el motor a plena excitación y a completa resistencia en serie del inducido cuando se cierran los contactos M, principal y auxiliar. El motor se acelera partiendo del reposo, con una c.d.t. máxima en la resistencia de arranque en serie y una c.d.t. prácticamente nula en bornes del inducido. Cuando se acelera el inducido, la f.c.e.m. y la tensión en sus bornes aumentan en función de la velocidad ( $E=k \phi S$ ). El relé V1 proyectado para cerrar sus contactos n.a. aproximadamente a un 50 por ciento de la tensión nominal, no se cerrará y acelerará el motor hasta que la velocidad de éste, a pleno flujo de excitación, desarrolle una f.c.e.m., de al menos aquel orden. Además, para que la f.c.e.m. llegue a alcanzar ese valor, la corriente debe limitarse lo suficiente para deducir la c.d.t. en bornes de la resistencia en serie y, de este modo, aumenta la c.d.t., en bornes del inducido.

2.- Cuando el relé V1 cierra sus contactos n.a. V1 en la línea de control 2, el relé de mando 1A es excitado, cortocircuitando el primer contacto de la resistencia en serie del inducido. La corriente de punta aumenta, el motor se acelera y se desarrolla una mayor f.c.e.m. cuando está alcance el 70 por ciento de la tensión nominal, el relé V2 quedará excitado.

3.- Cuando el relé V2 cierra sus contactos n.a. V2 en la línea de control 3, el relé 2A es excitado, cortocircuitando el segundo contacto de la resistencia en serie. La corriente de punta acelera de nuevo el motor, desarrollando una mayor f.c.e.m. Cuando la f.c.e.m. alcance el 85 por ciento de la tensión nominal, el relé V3 se excitará.

4.- Cuando V3 cierra sus contactos en la línea de control 4, el relé de mando 3A cortocircuita el último contacto de la resistencia en serie y, simultáneamente, abre el reóstato de campo a su ajuste de velocidad prefijado. El motor se acelera a su ajuste de carga, con el inducido a plena tensión.

Las ventajas de este arrancador de c.c. residen en que el motor no es acelerado a una etapa de mayor velocidad hasta que la corriente está suficientemente limitada y se haya alcanzado el grado de velocidad necesaria (medida por la f.c.e.m.). Por tanto, el tiempo necesario para la aceleración varía con la naturaleza de la carga aplicada al motor, y éste es acelerado automáticamente a su debido tiempo en vez de a tiempo definido. Una segunda ventaja de este arrancador está en la protección que ofrece al motor en el caso de una fuerte carga sostenida que podría ocasionar una acusada disminución de la velocidad; el relé V3 podría llegar a la posición de reposo si la bobina de sobre-carga dejase de funcionar; y no accionaría el contacto de cierre 3A hasta que las condiciones de carga se restableciesen a su valor normal. Sin embargo, existen algunos inconvenientes para la limitación de la velocidad, mediante el uso de relés de f.c.e.m. El primero está en que los relés son difíciles de ajustar para proporcionar la acción deseada a tensión y velocidad adecuadas para todas las condiciones de carga. Los relés son dispositivos inductivos, y no

c.d.t. caída de tensión.

responden de la misma forma a una rápida corriente transitoria en aumento como lo hacen a una lenta. Un segundo inconveniente está en que los siete relés están excitados durante el período de marcha.

En pequeños arrancadores de hasta casi 5 CV, los relés de control pueden eliminarse y los relés V1, V2, y V3, pueden accionar los contactos 1A, 2A y 3A directamente. Un tercero está en la molestia por posibilidad de un descenso acusado de la velocidad como resultado de una fuerte carga o de una baja tensión. Un cuarto, está en que este dispositivo no puede utilizarse cuando se emplea un control de la velocidad por debajo de la velocidad básica.

G) ARRANCADOR DE ACELERACION POR LIMITACION DE LA CORRIENTE, DE C.C., QUE UTILIZA RELES DE BOBINA DE RETENCION.

Como se indicó previamente, las bobinas del relé designadas por HC (bobina de retención) tienden a retener el relé en posición abierta siempre que las corrientes y f.m.m.s. sean grandes. Tal relé de baja resistencia serie es también denominado relé de bloqueo serie, y este tipo de arrancador es conocido, a veces, como arrancador de bloqueo serie, de c.c. El arrancador de la fig. 5.14 funciona del siguiente modo:

1.- Pulsando el botón de arranque se excitan el contactor M y el 3AC del circuito de control y los relés 3HC, 1 HC y 1A en el circuito de potencia del inducido. El motor se acelera a plena resistencia en serie del circuito del inducido, porque las bobinas 3HC y 1HC reciben la corriente irruptiva inicial de magnitud suficiente para bloquear los contactos del relé. La bobina 3Ac, que shunta M en el circuito de control, es un relé de cierre que funciona con efectividad en presencia de 3A sólo cuando la armadura del relé ha sido succionada cerca del punto de cierre.

2.- A medida que la corriente de inducido disminuye y el motor se acelera, la corriente en 1HC en oposición a la de 1A disminuye y puesto que 1A tiene muchas más vueltas y conduce la misma corriente, en condiciones de régimen permanente, origina la f.m.m. suficiente para cerrar los contactos 1A.

La corriente de inducido ahora es desviada por el trayecto de baja resistencia de los relés serie 2HC, 2A y 1A por los contactos n.a., 1A, cerrados por el relé 1A.

Cuando 1A se cierra, irrumpe una corriente y el motor se acelera. El régimen transitorio en 2HC, en serie con 2A, es suficiente para permitir que el primero domine al último hasta que la corriente vuelva a un valor lo suficientemente estable y disminuido. No obstante, en condiciones de régimen permanente, 2A cierra sus contactos n.a.

4.- La corriente de inducido ahora es desviada e irrumpe por el trayecto de baja resistencia de los relés serie 3HC, 3A, los contactos cerrados 2A, el relé 2A, los contactos cerrados 1A, y el relé 1A. Durante el período transitorio de la corriente, el 3HC es suficiente para dominar el 3A. Pero cuando la velocidad y la aceleración del motor producen la suficiente f.c.e.m. para reducir la corriente de inducido, el relé 3A en combinación con su bobina auxiliar 3AC, que shunta M, cierra los contactos n.a. 3A, derivando toda la red de la -



#### H) ARRANCADOR DE ACELERACION LIMITADOR DE LA CORRIENTE, DE C.C., QUE UTILIZA RELES SERIE.

Los relés serie de acción rápida, bobinados con unas cuantas vueltas de hilo grueso o pletinas, pueden utilizarse directamente para "sencibilizar" la corriente irruptiva de inducido y en consecuencia, acelerar el motor. Los fuertes muelles y los topes de entrehierro de estos relés pueden ajustarse mecánicamente para proporcionar maniobras rápidas de cierre así como rápidos disparos de los contactos. La figura 5.15 muestra un arrancador de relé serie, de c.c., - utilizado para poner en marcha un motor serie de c.c., que funciona - como sigue:

1.- Cuando se pulsa el botón de ARRANQUE, el relé M alimenta el circuito, de potencia del inducido y todas las líneas de control.- La fuerte corriente irruptiva que pasa por el relé 1S abre los contactos 1S n.c. en la línea de control 2. El relé 1S es un relé, de breve constante de tiempo, de acción rápida comparado con 1A, y el motor arranca con toda la resistencia del inducido en serie. Después de - que la corriente irruptiva de arranque desciende a un valor para el - que 1S no puede vencer por más tiempo la acción de su resorte, el relé 1S cede quedando sus contactos en estado desactivado.

2.- La línea de control 2 está alimentada mediante los contactos 1S n.c. del relé desexcitado 1S. Esta excita el relé de control 1A, haciendo que cierren sus contactos 1A. La corriente irrumpe ahora a través del relé de baja resistencia 2S y el contacto 1A n.a., cortocircuitando el relé 1S y una parte de la resistencia de arranque en serie. El motor se acelera hasta que la corriente irruptiva de - arranque decrece a un valor en el que 2S no puede permanecer cerrado por más tiempo, y se abre el relé 2S.

3.- La línea de control 3, alimentada por los contactos 2S n.c. del relé desexcitado 2S, hace que funcione el relé 2A, cerrando sus - contactos n.a. en bornes de la resistencia de arranque. La corriente ahora irrumpe a través del relé de baja resistencia 3S, cortocircuitando los relés 2S y 1S, así como la resistencia adicional en serie - del circuito del inducido. El motor se acelera hasta que la corriente irruptiva de arranque desciende a un valor para el que 3S no puede permanecer cerrado por más tiempo y se abre.

4.- La línea de control 4 es alimentada, haciendo funcionar el relé 3A y cortocircuitando todos los relés serie del circuito de - potencia así como la resistencia en serie del inducido. El motor se acelera a su velocidad normal y carga nominal. Como el motor es un motor serie, un dispositivo centrífugo contra el exceso de velocidad - en la línea de control 1 protege al motor contra el embalamiento en - el caso de eliminación de la carga mecánica.

Quando el arrancador de relés serie de la figura 5.15 está - funcionando, 4 relés permanecen siempre excitados: el relé M y los - tres relés de control 1A, 2A y 3A. Este es el mayor inconveniente de este arrancador. No obstante, el proyecto de su bobina presenta los mismos inconvenientes que los señalados anteriormente. Se observará, también que la operación de los relés serie es unas 100 veces más rápida que la de los relés de control. Por tanto, no existe posibilidad

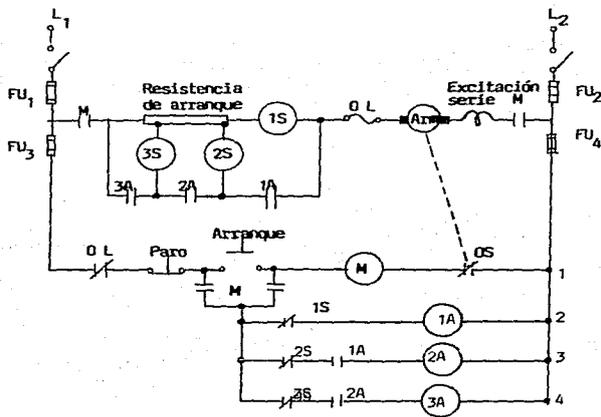


Figura 5.15 Arrancador de Aceleración por limitación de corriente de C.C., empleando relés serie.

dad de que, cuando el motor se acelere, un relé de control cierre sus contactos antes de que se abra un relé serie. El arrancador de relés serie y su método de control se consideran de gran seguridad, aunque el relativo gran número de relés excitados y los enclavamientos entre los relés serie y de control aumente algo el costo de mantenimiento. Este inconveniente se palió en el arrancador por caída de tensión, de bobina de retención que se considera en la sección I.

- 1) ARRANCADOR DE ACELERACION POR LIMITACION DE LA CORRIENTE, DE C. C. QUE UTILIZA BOBINAS DE RETENCION. (aceleración por caída de tensión).

La figura 5.16 muestra un arrancador de bobina de retención de c.c., que se emplea para poner en marcha un motor en serie. Este arrancador "sensibiliza" la corriente transitoria que circula por la resistencia de protección de arranque por medio de los relés de bobina de retención HC. Estos son relés diferenciales cuyas f.m.m.s. están en oposición. El funcionamiento del arrancador de la figura 5.16 es el siguiente.

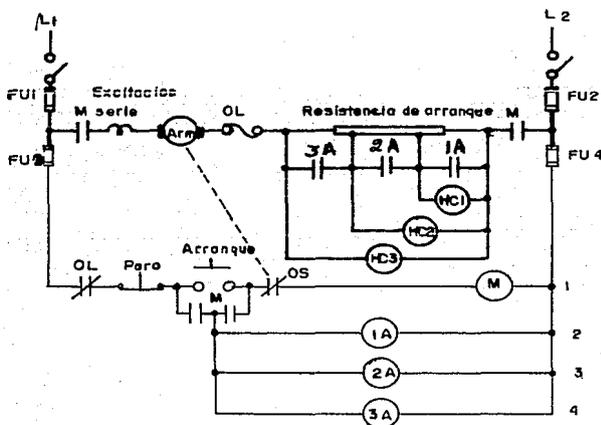


Fig. 5.16 Aceleración por limitación de corriente empleando bobinas de retención (método de la caída de tensión).

1.- Pulsando el botón de ARRANQUE se excita el contactor M, cerrando sus contactos principales y auxiliares. La corriente de inducido irrumpe en el circuito de potencia, ocasionando unas grandes caídas de tensión en bornes de todas las bobinas de retención de los relés diferenciales. Por lo tanto, los contactos 1A, 2A y 3A permanecen abiertos a medida que el motor se acelera.

2.- A medida que la corriente transitoria disminuye, la tensión en bornes del relé más debilitado HC1 se hace suficientemente pequeña, en el tiempo, para hacer que su contrabobina 1A cierre sus contactos 1A, n.a., Cuando estos últimos se cierran el relé HC1 queda cortocircuitado, así como una parte de la resistencia de arranque en serie con el inducido del motor. El motor se acelera a mayor velocidad debido a la corriente irruptiva del inducido.

3.- A medida que la corriente de punta disminuye, la tensión aplicada al relé debilitado HC2 se hace lo suficientemente pequeña, con el tiempo, para hacer que su contrabobina 2A cierre sus contactos 2A, n.a. Cuando estos últimos se cierran, el relé HC 2 queda cortocircuitado, así como una segunda parte de la resistencia de arranque en serie con el inducido del motor. El motor se acelera a mayor velocidad debido a la corriente irruptiva del inducido.

4.- Cuando la corriente irruptiva decrece, la tensión en bornes de HC 3 disminuye lo suficiente, con el tiempo, para hacer que su contrabobina 3A cierre sus contactos 3A, n.a. El motor se acelera a la velocidad normal con su circuito de inducido a plena tensión. Un contacto contra el exceso de velocidad OS, n.c., en la línea de control evita el embalamiento en el caso de que el motor se desconecte de la carga, mecánicamente, o si la carga disminuye sustancialmente.

El arrancador de la figura 5.16 marcha con 4 relés excitados, pero, en comparación con la figura 5.15 no necesita enclavamientos eléctricos en sus circuitos de control, entre los relés individuales. El método por caída de tensión, además, proporciona, por sí mismo, a los arrancadores de corriente elevada más facilidad que los dispositivos que utilizan relés serie, cuyas bobinas deben soportar la plena corriente de inducido y las transitorias.

Obsérvese que todos los arrancadores por limitación de la corriente en bucle cerrado de la figura 5.13 a 5.16 poseen la ventaja de acelerar el motor a su debido tiempo, es decir, cuando la corriente irruptiva ha disminuido a un valor normal (véase figura 5.2). En cargas muy fuertes, con mucha inercia, empleará algo más de tiempo antes de que el motor pueda acelerarse, y la corriente disminuirá lentamente en cada punto. A diferencia de los tipos de arrancador en bucle abierto, de tiempo definido, estos arrancadores son capaces de sensibilizar la carga y modificar su secuencia de tiempo para adecuar las condiciones de carga, utilizando la irrupción de la corriente de inducido como indicación de la carga.

J) ARRANCADOR DE ACELERACION POR LIMITACION DE LA CORRIENTE, DE C.A., QUE EMPLEA BOBINAS DE RETENCION Y AMPLIFICADOR MAGNETICO.

Los amplificadores magnéticos también se han utilizado en los circuitos de arranque y de control para amplificar los impulsos de corriente sensibilizados y suministrar la potencia para hacer funcionar los relés diferenciales. La figura 5.17 muestra la tensión de salida en bornes del devanado compensador o polo de conmutación,  $x-x'$  de un motor shunt. En el caso de motores serie o compound, esta salida puede hacerse en bornes de la excitación serie.

Cuando la corriente irruptiva es elevada, la tensión de la salida en bornes del elemento serie es alta. Esta salida sensibilizada, se conecta a la excitación o devanado de control de un amplificador magnético de c.c. (o devanado de saturación) que está conectado a una fuente de c.a. Cuando el devanado de control satura el núcleo, la inductancia diferencial del amplificador magnético es pequeña, y la tensión de salida  $E_{ca}$  de C. a., en bornes del amplificador magnético es grande. Recíprocamente, cuando la excitación de control, de c.c., es baja o nula, la autoinducción y reactancia de los devanados serie son elevadas, y la salida de c.a. es baja.

Un rectificador a base de semiconductores (Si o Ge) de onda completa transforma la salida de c.a. en continua, para excitar las bobinas de retención de los relés diferenciales conectadas en paralelo de la figura 5.17. Las bobinas de retención de la figura 5.17, son similares a las de la figura 5.16 y funcionan en la secuencia creada por los diferentes valores de la tensión de c.c. Por tanto, el circuito de control es idéntico al mostrado en la figura 5.16. El arrancador de la figura 5.17 funciona como sigue:

1.- El motor arranca con la máxima resistencia en serie con el inducido y máxima corriente transitoria a través del circuito del inducido. La elevada tensión de entrada, de c.c., en el amplificador magnético, produce una elevada tensión de salida de c.c., en bornes de todas las bobinas de retención, manteniendo abiertos los contactos 1A, 2A y 3A. Cuando la corriente irruptiva disminuye, la bobina de retención más debilitada, 1HC, no puede retener su armadura por más tiempo y el relé diferencial 1A cierra los contactos 1A. El relé diferencial 1A es el relé más robusto porque tiene la mayor tensión aplicada en sus bornes.

2.- Cuando el relé 1A funciona simultáneamente cortocircuita un contacto de la resistencia en serie del inducido y abre un contacto 1A n.c. en serie con 1HC, con lo cual evita que 1HC sensibilice los impulsos de corriente. Cuando 1A cortocircuita la resistencia en serie del inducido la tensión diferencial en bornes del relé 1A es la misma que la tensión de inducido; pero como su contrabobina está desconectada, el relé 1A permanece excitado.

3.- La corriente transitoria que se origina al cortocircuitar un contacto de la resistencia en serie acelera el motor y proporciona una elevada tensión de salida de c.c. del amplificador magnético a las bobinas de retención 2HC y 3HC. A medida que la corriente irruptiva disminuye, puesto que la tensión en bornes de 2A supera a la de 3A, el relé diferencial 2A cerrará antes que 3A siempre que la tensión en  $x-x'$  disminuya a un valor inferior. Cuando 2A cierra, cortocircuita la resistencia adicional del circuito del inducido y -

abre sus contactos n.c. en serie con 2HC. Las bobinas del relé 1A y 2A están ahora en paralelo con el inducido.

4.- Cuando el relé 2A funciona, la corriente irrumpe de nuevo bloqueando el relé 3A por la acción de 3HC. Por último con todo, la corriente de inducido descende a un valor normal, y 3A prevalece sobre 3HC. El motor se acelera a su velocidad normal con el inducido a plena tensión

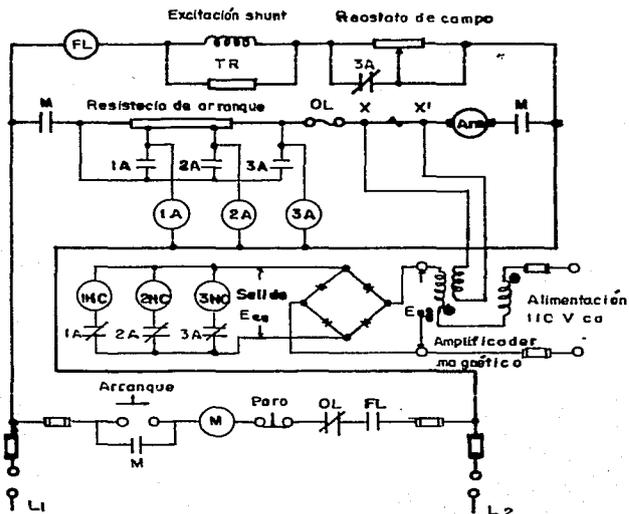


Fig. 5.17 Aceleración por limitación de corriente empleando un amplificador magnético y bobinas de retención para poner en marcha un motor de c.c.

El arrancador de amplificador magnético mostrado en la figura 5.17 funciona en la posición de MARCHA con todas sus bobinas del relé de cierre, 1A, 2A y 3A, conectadas en paralelo con el inducido, y con las bobinas diferenciales limitadoras (HC) en bornes de la salida Ecc en circuito abierto del amplificador magnético. Por tanto, las cargas transitorias o cambios de control de la velocidad no afectarán al funcionamiento del motor sino durante el período de arranque.

El circuito del amplificador magnético de la figura 5.17 también tiene la ventaja de detectar relativamente pequeñas variaciones de la corriente del inducido y transformarlas en tensiones que pueden emplearse para hacer funcionar relés diferenciales. El arrancador puede ser utilizado con las mínimas modificaciones de relés en una amplia gama de motores, debido a que ambas bobinas de cada relé diferencial son bobinas de tensión en vez de corriente. Una segunda ventaja del arrancador está en la respuesta, relativamente rápida, del amplificador magnético a los cambios de saturación (responde en unos cinco ciclos de un circuito de 60 Hz, o en 1/12 s). El propio amplificador, comparado con los amplificadores electrónicos de c.a. que tienen etapas moduladoras y demoduladoras de entrada y de salida, de c.c., es relativamente sencillo, insensible a choques o vibraciones, eléctricamente robusto, y, además, no necesita más mantenimiento que un transformador ordinario. Puede utilizarse para el arranque en c.a. y para el control de la velocidad de motores de c.c. y de c.a., así como en aplicaciones de servomecanismos, como se indica en los capítulos siguientes.

El anterior examen de arrancadores automáticos de c.c., no es bajo ningún concepto de exposición completa de los diversos principios empleados en la aceleración de tiempo definido o por limitación de la corriente. Sólo se presentaron unos cuantos tipos representativos de arrancadores de c.c. para dar una impresión de la naturaleza de los procedimientos utilizados para conseguir la secuencia automática de la conmutación manual tratada en el capítulo precedente.

## CAP. VI CONTROL DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA

### VI.1 GENERALIDADES.

La velocidad de un motor de c.c. puede variarse mediante el - cambio de una de las variables de la ecuación fundamental de la velocidad,

$$s = K \frac{V_a - I_a R_a}{\phi}$$

En la primera parte de este capítulo se examinarán cuatro métodos de control de la velocidad de un motor de c.c. Estos métodos - son:

1.- Modificación del flujo de excitación,  $\phi$ , por medio de un reóstato variable serie o shunt. Este método se conoce como #control de campo# (fig. 6-1a).

2.- Variación de la tensión  $V_a$  en bornes del inducido mediante el empleo de una resistencia variable en serie con el inducido. - Este método se denomina #control de la resistencia del inducido# - - (fig. 6-1a).

3.- Variación de la tensión  $V_a$  en bornes del inducido, y la corriente  $I_a$  en el mismo, mediante combinación de dos resistencias variables en paralelo y en serie con el inducido. Este método se denomina #control de la resistencia serie y shunt del inducido# (fig. - 6.1b).

4.- Empleo de una fuente controlada de tensión de c.c. variable para modificar la tensión  $V_a$  en bornes del inducido de un motor - de excitación independiente. Este método se conoce como #control de la tensión de inducido# (fig. 6-1c).

Después del examen de estos cuatro métodos, este capítulo abordará diversos proyectos de reguladores o controles manuales y automáticos que incluyen las funciones de arranque, inversión, control de la velocidad y frenado.

### VI.2 CONTROL DE CAMPO

Cuando se aplica la tensión nominal o de línea al inducido de un motor de c.c. ( $V_a=V_l$ ) y el flujo de campo se varía manual o automáticamente por medio de un reóstato de campo en serie o en paralelo - con el devanado de excitación, el método de control de la velocidad - se denomina #control de campo#. Como se observa en la figura 6-1a - cuando el motor se pone en marcha y se cortocircuita la resistencia variable del inducido (en el punto a) de forma que  $V_a$  iguale  $V_l$ , se - puede conseguir el control de la velocidad mediante variación del - reóstato de campo del punto a' (resistencia de campo no añadida o corriente a plena excitación) al punto b' (máxima resistencia de campo - o mínima corriente de excitación).

La velocidad alcanzada con la plena tensión de inducido y plena corriente de excitación (resistencia de campo no añadida) se deno-

mina velocidad básica del motor. Por consiguiente, incrementando la - resistencia de campo disminuirá la corriente y el flujo de excitación en la ecuación fundamental de la velocidad, haciendo que aumente la - velocidad. De ahí que deba decirse que el control de campo sólo puede originar velocidades por encima de la básica.

El control de campo como método de control de la velocidad para conseguir velocidades por encima de la básica presenta las siguientes ventajas sobre otros métodos de control de la velocidad: (1) el control de campo es relativamente económico y sencillo de lograr, tanto manual como automáticamente; (2) es relativamente eficaz en términos de rendimiento del motor, puesto que las pérdidas del circuito de excitación sólo representan del 3 al 5 por ciento de la potencia total absorbida por el motor; (3) dentro de ciertos límites, el control de campo no afecta la regulación de la velocidad en el caso de - motores serie, shunt, o derivación y compound o compuestos, y (4) permite un control de la velocidad relativamente suave y continuo.

Sin embargo, la tercera ventaja conlleva una observación; que este método de control de la velocidad se consigue mediante la debilitación del flujo de excitación dentro de unos límites. Si el campo se debilita considerablemente, se originan velocidades peligrosamente elevadas. Puesto que un aumento de la velocidad (creado por una disminución de flujo) se traduce en un incremento de la carga y de la corriente de inducido, el aumento del par se produce ( $T = k\phi Ia$ ) por un incremento considerable de la última.

Con un campo débil y elevada corriente de inducido, el motor-shunt de c.c. es particularmente susceptible a los efectos de la inestabilidad de la reacción de inducido y puede embalsarse de la misma forma que un motor compound diferencial. Precisamente por esta razón, los motores de c.c. se arrancan a plena corriente de excitación. A velocidad y corriente de inducido elevadas, además, aumentan las dificultades de conmutación puesto que se invierten más rápidamente las elevadas corrientes de inducido y pueden producirse serios desperfectos en el conmutador por la formación del arco.

De ahí que se acostumbre a establecer un límite máximo permisible de exceso de velocidad cuando se utiliza el control de campo como método de control de la velocidad. Generalmente, éste es 1,5 veces la velocidad básica. Los inconvenientes del control de campo como método de control de la velocidad son (1) imposibilidad de obtener velocidades por debajo de la base, (2) inestabilidad a elevadas velocidades debido a la reacción de inducido, (3) dificultades de conmutación y posible deterioro del conmutador a elevadas velocidades.

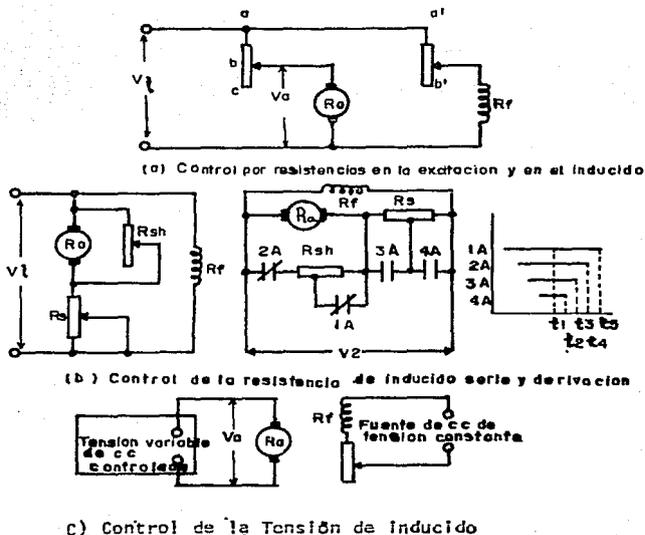


Fig. 6.1 Métodos de control de la velocidad del motor de c.c.

### VI.3 CONTROL DE LA RESISTENCIA DE INDUCIDO.

Cuando el reóstato de campo se ajusta de forma que se produce la excitación normal (en la región de saturación), y se reduce la tensión en bornes del inducido, por medio de una resistencia variable en serie con el inducido, el método de control de la velocidad se denomina control de la resistencia de inducido.

Según la figura 6-1a el reóstato de campo está ajustado para proporcionar la excitación normal, y la resistencia en serie del inducido está ajustada de forma que la tensión de inducido,  $V_a$ , queda regulada por debajo de la tensión de línea,  $V_l$ . El control de la velocidad se consigue mediante regulación de la resistencia en serie con el inducido. Aumentando la resistencia en serie del inducido se reduce su tensión en bornes (a una determinada carga) en la ecuación fundamental de la velocidad,  $S = k(V_a - I_a r_a) / \phi$ , haciendo que la velocidad descienda. Por esta razón, puede decirse que el control de la resistencia de inducido sólo puede originar velocidades por debajo

de la básica. La corriente de inducido en la ecuación fundamental de la velocidad es función de la carga. Para un valor de ajuste determinado de la resistencia en serie del inducido, un aumento de la carga provocará un aumento de c.d.t. en bornes de la resistencia conectada en serie con el inducido, que originará una disminución de la velocidad.

Para un valor de ajuste de la velocidad en vacío por debajo de la velocidad básica, el control de la resistencia de inducido provocará una caída acusada de la velocidad con la aplicación de la carga, resultando una pobre regulación de la velocidad. Cuanto más grande es el valor de la resistencia en serie del inducido, tanto más pobre es la regulación de la velocidad del motor. Además, la corriente de inducido que circula a través de la resistencia conectada en serie producirá unas pérdidas apreciables ( $I_a^2 R_s$ ) que reducen el rendimiento global del motor. Aun cuando estas pérdidas, por fortuna, no producen calor en el interior del motor, se necesita una resistencia variable más grande, adecuada para servicio permanente, conectada externamente y capaz de conducir la corriente nominal de inducido. Esta resistencia variable se utilizará tanto para el arranque del motor como para el control de la velocidad mediante control de la resistencia del inducido.

Las ventajas del control de la resistencia de inducido son: - (1) la posibilidad de alcanzar velocidades por debajo de la básica, - (2) simplicidad y facilidad de conexión y (3) la posibilidad de combinar las funciones de arranque del motor con el control de la velocidad.

Los inconvenientes del control de la resistencia de inducido son: (1) el costo relativamente elevado de las resistencias grandes, adecuadas para servicio continuo, capaces de disipar grandes cantidades de energía (particularmente en los motores de gran potencia), (2) pobre regulación de la velocidad para un ajuste determinado de la velocidad, (3) rendimiento bajo que se traduce en un elevado costo de funcionamiento, y (4) dificultad de obtener un control continuo de la velocidad para potencias grandes.

La combinación del control de la resistencia de inducido y de campo de un motor shunt, mostrada en la figura 6-1a, proporciona un medio razonablemente eficaz y relativamente barato de obtener velocidades por encima y por debajo de la básica en el caso de motores de c.c. pequeños. En los de potencia nominales grandes, cuando se deseen tener muy bajas velocidades para el control en marcha lenta o arrancadas frecuentes, se precisa una resistencia bastante grande, en el circuito de inducido, de valor nominal de potencia relativamente elevado. Dicho tipo de resistencia da lugar a un funcionamiento de bajo rendimiento y es relativamente cara. Esta dificultad se salva mediante el control de la resistencia de inducido en serie y shunt.

#### VI.4 CONTROL DE LA RESISTENCIA DE INDUCIDO EN SERIE Y SHUNT.

La figura 6-1b muestra el esquema simplificado de un control de la velocidad por reóstato que emplea resistencias combinadas en serie y en paralelo con el inducido. Rsh es una resistencia variable -

que shunta el inducido, y  $R_s$  es una resistencia variable en serie con el inducido. La primera actúa como un desviador que tiende a reducir la corriente de inducido, a medida que se reduce la resistencia ( $R_{sh}$ ). La última,  $R_s$ , actúa de la misma forma que el control sencillo de la resistencia de inducido descrito en la sección anterior. De forma que en la ecuación fundamental de la velocidad:  $S = K \frac{V_a - I_a R_a}{\phi}$  para un

flujo de campo constante, a una carga determinada, un aumento de  $R_s$  producirá una disminución de  $V_a$  y una caída de la velocidad. Un aumento de  $R_{sh}$  producirá un aumento en la caída  $I_a R_a$  y también una disminución de la velocidad. La velocidad puede aumentarse, por tanto, disminuyendo a la vez  $R_s$  y  $R_{sh}$  (la última dentro de ciertos límites). Como en el caso del control de campo, existe un límite máximo permisible al efecto de shunt producido por  $R_{sh}$  a velocidades muy elevadas. Si el valor de  $R_{sh}$  se aproxima al de un cortocircuito en bornes del inducido, se originará una extrema inestabilidad del par como resultado de la tendencia hacia velocidades elevadas y aumento de cargas. El efecto neto de la resistencia shunt,  $R_{sh}$ , reside en hacer la velocidad de funcionamiento menos susceptible a los cambios del par resistente de la carga y, como resultado, mejorar la regulación de la velocidad del motor por encima de la que podrían obtenerse empleando solamente el control de la resistencia de inducido. Se señalará que, sin embargo, esta reducción de la resistencia shunt produce una reducción proporcional del par desarrollado. El control por resistencia shunt, en bornes del inducido, junto con la resistencia de inducido, se empleará, por tanto, donde se desee mantener aproximadamente la misma velocidad de funcionamiento y cuando el par resistente tienda a variar. La resistencia shunt puede emplearse también para proporcionar el frenado dinámico.

La figura 6-1b también muestra el circuito de conexiones fundamental para el arranque y funcionamiento con control de la resistencia de inducido en serie y shunt, así como la secuencia de conexión utilizada en estos contactores. Obsérvese que la secuencia de conexión que en el arranque, sólo está cerrado el contactor 2A. Esto proporciona la resistencia máxima de protección en serie con el inducido, así como corriente regulada en el mismo, para poder desarrollar el par de arranque necesario. El motor se acelera mediante etapas progresivas (1) - abriendo el 2A, n.c., (2) cerrando el 3A, n.a., y (3) cerrando el 4A, n.a. En el tiempo  $t_1$  indicado en el diagrama de la secuencia, por tanto, todos los contactos están en su posición de funcionamiento y el motor funciona como motor shunt.

Disminuciones progresivas de la velocidad, con una regulación de la misma razonablemente buena pueden ahora conseguirse abriendo - (desexcitando) el 4A en el tiempo  $t_2$ , seguido del 3A, en el tiempo  $t_3$ , desexcitando 2A (1A está abierto y excitado) para proporcionar la resistencia de inducido combinada en serie-shunt en el tiempo  $t_5$ . Así, en el último caso, funcionando con todos los contactos como se indica en la figura, proporciona la velocidad de funcionamiento más baja, con mejor regulación de la velocidad que la que se conseguiría por el aumento de la resistencia en serie del inducido. Además, puesto que el par aplicado de una carga determinada es más bajo a velocidades reducidas, el motor no sufre el efecto del par más pequeño desarrollado como resultado de la desviación de la corriente de inducido por  $R_{sh}$ .

Las ventajas del control de la resistencia de inducido en serie-shunt son (1) mejor regulación de la velocidad (superior a la del control de la resistencia de inducido), y (2) posible utilización de la resistencia de inducido shunt para el frenado dinámico.

Los inconvenientes son: (1) par de funcionamiento reducido con el aumento de la desviación de la corriente de inducido, y (2) rendimiento reducido debido a las pérdidas de potencia en las resistencias serie y shunt.

## VI.5 CONTROL DE LA TENSION DE INDUCIDO.

El rendimiento relativo de los motores más pequeños no representa una consideración seria, mientras que el par relativo, regulación de la velocidad y control continuo son de alguna importancia en las aplicaciones de esos motores. En el caso de motores de potencia más elevada, sin embargo, el rendimiento, el par, la buena regulación de la velocidad, y la suavidad en el control continuo de la velocidad son todas ellas consideraciones sumamente importantes. Las cargas fuertes, con gran inercia, requieren una aceleración suave durante una amplia gama de velocidades. Todos estos requerimientos pueden satisfacerse mediante el empleo de una tensión variable de c.c. de una fuente de alimentación de capacidad suficiente para proporcionar a un motor de c.c. la tensión y corriente del inducido requeridas. El campo queda siempre excitado separadamente desde una fuente de alimentación de corriente o tensión constantes, como se muestra en la figura 6-1c. Este método de control también elimina la necesidad de una resistencia de arranque en serie con el inducido.

Si la tensión del inducido que se suministra de la fuente de alimentación variable de c.c. es cero, el motor desarrolla un par nulo ( $T = k \phi I_a$ ) y queda en reposo. Si la tensión de inducido se incrementa ligeramente, de acuerdo con la ecuación fundamental de la velocidad  $S = k (V_a - I_a R_a) / \phi$ , el motor se pone en marcha y gira a una velocidad, lenta con un mínimo de aceleración. La corriente de inducido queda limitada debido a la baja tensión en bornes del inducido. Reduciendo la tensión de inducido a cero, e invirtiendo la polaridad de la fuente de tensión variable, se parará el motor y se invertirá el movimiento de acuerdo con la regla de la mano izquierda. Para motores de c.c. fraccionarios y de valor nominal de potencia relativamente baja, la fuente variable de tensión de c.c. puede ser un amplificador de semiconductores (rectificador de silicio controlado), alimentado por una fuente de c.a. trifásica o monofásica.

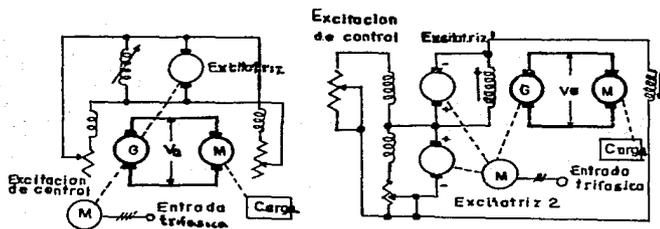
Motores de potencia nominal moderada, hasta 100 CV, pueden ser de tensión de inducido controlada empleando amplificadores rotativos tales como Retotrol, Regulex o amplidinas pequeñas. También pueden emplearse amplificadores estáticos, tales como amplificadores magnéticos como fuente regulable de tensión de c.c. Los motores de c.c. más grandes, por encima de 100 CV, se controlan de la misma forma por medio de amplificadores rotativos tales como el sistema de control amplidina o Ward-Leonard, mostrado en la figura 5-2a.

El método Ward-Leonard es un amplificador rotativo que consiste en un motor (polifásico) de c.a. accionando un generador principal-

Y una o más excitatrices (generadores shunt de c.c. pequeños). Como se muestra en la figura 6-2a la excitatriz (única) proporciona al motor y generador un control de campo con una tensión de c.c. constante. La amplificación se consigue a partir de una variación pequeña de la potencia de excitación en el campo del generador principal, originando una potencia de salida mayor directamente desde el inducido del generador principal al inducido del motor de c.c. para una carga determinada, la corriente de inducido del motor es constante. El flujo y la corriente de excitación del motor generalmente se mantienen constantes (puesto que  $T = K \phi I_a$ ) de este modo el método Ward-Leonard representa en esencia un sistema de par constante, potencia variable ( $hp = TS/5252$ ).

Mediante conmutador de inversión (no mostrados) en el circuito del inducido es posible abrir e invertir las conexiones de línea al inducido del motor, parando e invirtiendo de esta forma el sentido de rotación. Sin duda, el costo inicial del sistema de control Ward-Leonard es mucho más elevado que uno de los métodos de control reostáticos considerados previamente.

Puesto que el rendimiento, despreciando el de la excitatriz, es esencialmente el producto de los rendimientos individuales de las dos máquinas mayores, el rendimiento de este método no es tan elevado como el de control de la velocidad por reóstato mediante el método de control de campo. Pero las ventajas del control de la tensión de inducido empleando el método Ward-Leonard son:



(a) Sistema Ward-Leonard simplificado (b) Sistema Ward-Leonard de dos excitatrices.

Fig. 6.2 Métodos Ward-Leonard de Control de la tensión de inducido.

- 1.- Una amplia gama de velocidades desde el reposo a altas-velocidades en cualquier sentido.
- 2.- Inversión rápida e instantánea sin corriente de inducido excesivamente elevadas.
- 3.- Arranque sin necesidad de resistencia de inducido en serie.

4.- Control continuo desde el reposo a la velocidad máxima - en cualquier sentido.

5.- El método permite la adaptación de amplificadores intermedios electrónicos, de semiconductores y magnéticos, para proporcionar etapas de amplificación para un motor extragrande. De esta forma, la potencia en el circuito de control es muy pequeña.

6.- Óptima regulación de la velocidad para cualquier valor - de la misma.

Estas ventajas compensan, a la larga, el costo inicial elevado y el rendimiento global, algo intermedio, del conjunto motor-generador del método Ward-Leonard en comparación con otros métodos de control de la velocidad.

El tiempo de respuesta del sistema de control Ward-Leonard - puede mejorarse mediante el método de la doble excitatriz mostrado en la figura 5-2b en este proyecto, dos excitatrices, junto al generador principal, están acoplados al árbol del motor de c.a. La excitatriz-2 (a veces denominada excitatriz principal) suministra la excitación para el campo de control de la excitatriz 1 así como para los campos del generador principal y del motor accionado, conectados en serie - (mediante las excitatrices 1 y 2). La tensión (principal) de la excitatriz 2 es más elevada (generalmente 230 V) que la tensión nominal - de salida de la excitatriz 1 (generalmente 115 V). El inducido de la excitatriz 1 está siempre conectado de forma que se opone a la f.e.m. de la excitatriz principal 2. De esta forma, un incremento en la - - excitación del campo de control (excitatriz 1) hará aumentar la tensión del campo del generador principal y también hará elevar la tensión de inducido,  $V_a$ , aplicada al inducido,  $V_a$ , aplicada al inducido del motor, de forma que se incrementa la velocidad del motor. Al mismo tiempo, el aumento de la acción en oposición, producida por la excitatriz 1 contra la excitatriz 2, reduce la corriente de excitación del motor, aumentando también la velocidad de éste. El aumento de la excitación de campo de control, por tanto, ha producido dos efectos, los cuales tienden a elevar la velocidad del motor. La respuesta del motor a los cambios débiles de la excitación de control queda mejorada, tanto en tiempo de respuesta como en sensibilidad. Este sistema, por supuesto, no es un sistema de par constante, puesto que el flujo de campo está sujeto a cambios; podría denominarse sistema de par variable, potencia variable, con aumento de la potencia al incrementar la velocidad.

## CAP. VII CONTROL ELECTRONICO DE MOTORES DE C.C.

## VII.1 GENERALIDADES.

La historia del control de motores en el siglo pasado y en los comienzos del presente empezó con el desarrollo de los motores resistivos de c.c. gobernados manualmente mediante procedimientos de control del inducido y de la excitación. Con el desarrollo del motor de c.a. y la extensa distribución de energía eléctrica de c.a. - en las tres primeras décadas del presente siglo, se idearon diversos tipos de procedimientos de control de motores de c.a. y decreció el interés hacia el motor de c.c. La aparición de la válvula electrónica triodo de gas y de los tiratrones, hermanado al desarrollo paralelo de la reactancia de núcleo saturable, el amplificador magnético, y diversos amplificadores rotativos de potencia (Amplidina, Regulex, Rototrol y Ward-Leonard) en las tres décadas siguientes (entre 1930- y 1950), volvió a despertar el interés del control de la velocidad - del motor de c.c.

El desarrollo del tiristor o rectificador de silicio controlado (SCR) para servicios de baja y media potencia en la década de los 50, ha creado posibilidades ilimitadas para el control de motores de c.c., desde una fuente de c.a., mediante procedimientos electrónicos. El pequeño tamaño, la elevada seguridad en el funcionamiento y la relativa eficacia del SCR ha empezado a dominar la última mitad del siglo XX en el control de motores de c.c. y de c.a. de pequeña o mediana potencia, desde una fuente de c.a.. Hasta el momento actual, los SCR son ahora, asequibles hasta 400 A (eficaces) - con tensiones nominales (de paso y de bloqueo de pico) hasta 1200 V (GE, tipo C 290 PB). Por encima de esta potencia, es costumbre, por ahora, emplear sistemas de conversión tales como rectificadores de vapor de mercurio, amplificadores magnéticos, convertidores rotativos, y grupos convertidores para transformar y proporcionar la c.c. - necesaria para motores de c.c. extragrandes (superiores a 100 CV a 115 V de c.c. y 200 CV a 230 V de c.c.). Puesto que el rectificador controlado de silicio puede utilizarse para controlar la velocidad - de motores de c.c. de 115 V hasta 50 CV y motores de 230 V hasta 100 CV desde una fuente de alimentación de c.a. monofásica o trifásica, - su versatilidad y el tamaño reducido del equipo de control que se necesita, augura grandes promesas para el control de motores de pequeña y mediana potencia por métodos electrónicos.

El aspecto típico de un rectificador controlado de silicio - (SCR) se muestra en la figura 7-1a. Un monocristal de tres uniones (de aleación de silicio) está situado en el interior de una pastilla cerámica de la que sale un conductor anódico flexible multitrenzado (o cola de puerco) desde una capa positiva de material semiconductor. El terminal de cátodo, unido a masa en la envoltura metálica, se saca desde una capa negativa en forma de tornillo fijado a una tuerca hexagonal, de manera que el rectificador controlado de silicio (SCR) puede atornillarse a un disipador metálico de calor. Un ~~brabillón~~ - para el control o conductor de puerta (Gate) que sobresale de la envoltura se toma de una capa positiva de material semiconductor, separada del ánodo y el cátodo, respectivamente, por uniones adecuadas como se muestra en la figura 7.1b. El SCR puede considerarse forma-

do por dos transistores: un npn y un pnp conectado en oposición - según la figura 7.1b. El resultado es la producción de un semiconductor pnpn que se compone de tres uniones: anódica, de control y catódica ( $j_1$ ,  $j_2$ , y  $j_3$  respectivamente) entre las cuatro zonas producidas en un sólo monocristal impurificado de uniones.

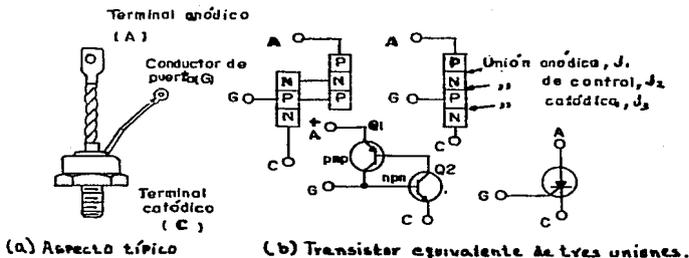


Fig. 7.1 Rectificador de silicio controlado (SCR)

El funcionamiento del SCR puede analizarse atendiendo a la teoría de un simple transistor en términos de transistores pnp y npn Q1 y Q2 respectivamente. Según la figura 7.1b, el colector de Q2 gobierna la base de Q1 y simultáneamente el colector de Q1 gobierna la base de Q2. Si  $\beta_1$  es la ganancia de corriente de Q1, y si  $\beta_2$  es la ganancia de corriente de Q2, el producto  $\beta_1 \beta_2$  es la ganancia del bucle de realimentación positivo o  $\beta_3$ . Cuando  $\beta_3$  es inferior a la unidad, el circuito se halla en un estado estable y el SCR no está polarizado; es decir, la única corriente que circula entre el ánodo y el cátodo es la corriente de corte del colector entre las dos zonas del transistor, traduciéndose en una impedancia muy grande entre el ánodo y el cátodo. Cuando se aplica una tensión positiva a la puerta de control, G, el transistor Q2 (la zona npn) está polarizado en sentido de paso, produciendo un incremento en la corriente de colector a un punto donde su ganancia de corriente  $\beta_1$  ocasionará que la ganancia de lazo  $\beta_3$  sea mayor que la unidad. El circuito luego se convierte en regenerativo, haciendo que la corriente de colector de ambas zonas aumente rápidamente a un valor máximo limitado por el circuito exterior. Como que las zonas npn y pnp se llevan a la saturación, la impedancia entre el ánodo A y el cátodo C disminuye a un valor muy pequeño, y la corriente unidireccional puede circular en el sentido de A a C.

Quando se dispara mediante una tensión positiva a G de un estado de bloqueo al de paso o conducción, es innecesario continuar manteniendo una tensión positiva a la puerta. El SCR permanecerá en estado de conducción por que la zona pnp aporta la ganancia de corriente suficiente para gobernar de una forma regenerativa la base de la zona npn. De esta forma, simplemente un pulso positivo, de magnitud suficiente para incrementar  $\beta_1$  de forma que  $\beta_3$  sobrepase la unidad, es todo lo que se requiere para iniciar la autogeneración y

el estado  $\neq$  de conducción $\neq$ .

El SCR puede ponerse fuera de servicio solamente mediante la reducción de la corriente de colector de la zona pnp de forma que  $\beta$  sea menor que la unidad.

Esto sólo puede conseguirse disminuyendo la tensión de emisor o ánodo A de la zona pnp, para reducir  $\beta$  a un valor inferior a la unidad y restablecer el estado estable  $\neq$  de bloqueo $\neq$ . De esta forma, mientras la puerta inicia la conducción del SCR, no tiene control sobre ésta una vez iniciada.

Puesto que puede dispararse de un estado de conducción elevada a uno bajo (conducción-bloqueo) y viceversa (bloqueo-conducción) - mediante la reducción de la tensión anódica y de los impulsos positivos de disparo de puerta, respectivamente, el SCR puede emplearse como interruptor para corrientes bajas y moderadas (hasta 400 A). La figura 7.2 muestra el empleo del SCR como interruptor de la fijación en el que el inducido de un motor de c.c. se conecta a una fuente de c.c. (no se muestran las Resistencias de excitación y de protección) En ausencia de un impulso positivo a G, el interruptor está abierto y el inducido del motor desexcitado. La resistencia de puerta,  $\neq$  g, conectada entre el cátodo y la puerta, proporciona, una corriente negativa, de polarización de puerta, asegurando la condición estable  $\neq$  de bloqueo $\neq$ . Incrementando el valor de rg puede aumentarse la sensibilidad, y puede asegurarse cualquier grado reducido de la misma - mediante la selección adecuada de rg. El motor se conecta al circuito mediante la aplicación de un impulso positivo de tensión (0,5 a - 1.0 V con una corriente de aproximadamente 25 mA durante 1  $\mu$ s.). El motor en funcionamiento sólo puede desconectarse una vez que esté excitado abriendo el contacto n.c. M. Cerrando M otra vez, no hará que el motor se conecte hasta que reaparezca un impulso positivo en G.

En la figura 7.2 se muestra un método alternativo de conexión - desconexión, empleando un principio de constante de tiempo RC, que también se sirve de una fuente de c.c. El motor queda conectado mediante un impulso positivo en G.

(\*Por esta razón, el SCR es el semiconductor equivalente al tiratrón e ignitrón. En dichas válvulas electrónicas, la tensión positiva aplicada a la rejilla de gobierno inicia el cebado, pero la conducción se corta sólo cuando la tensión anódica se reduce a un punto tal en el que empieza la desionización. Sin embargo, el SCR no requiere filamento calefactor alguno, ni transformador para corriente de filamento, ni se realiza ningún retardo para la ionización, y ninguna pérdida de potencia en el estado de  $\neq$  bloqueo $\neq$ ; además, es de tamaño mucho más reducido para el mismo valor nominal de la corriente. Los circuitos de la figura 7.2 hasta 7.5 son circuitos de tiratrones e ignitrones que se han simplificado mediante el uso del SCR.\*)

Seguirá en funcionamiento hasta que cierre el contacto n. a. M, colocando la conexión entre R y C a tierra. Por tanto, a medida que se va cargando el C, sitúa el punto A a un potencial negativo con respecto a tierra, y se origina el corte del SCR. Puesto que M-

es un interruptor normal abierto, puede utilizarse otro SCR para cerrar el circuito capacitivo en derivación. De esta forma, puede conectarse el motor mediante la aplicación de un impulso positivo al SCR de la figura 7.2b y desconectarse mediante la aplicación de otro impulso positivo al segundo SCR, que se utiliza en vez de M. La conmutación del transistor, o alternativamente el método mostrado en la figura 7.2e, puede ser empleado para reconectar el segundo SCR, con el resultado de que un relé o un motor pueden conectarse o desconectarse por medio de impulsos de disparo positivos, como se describe a continuación.

En presencia de un potencial de puerta reiterativo y positivo, puede accionarse un motor de c.c. desde una fuente de c.a., según el interruptor de semionda de la figura 7.2c. Siempre que la tensión anódica sea negativa en el SCR, no hay conducción; pero cuando el potencial de c.a. es positivo, se reanuda la conducción, y la corriente a través del inducido del motor es unidireccional.

Si la fase de la tensión aplicada a la puerta Egc es alterna y está desfasada con respecto a la fuente de alimentación de c.a., -Eac, el circuito puede ser empleado como método de control de la tensión de inducido. El valor medio de la tensión de c.c. aplicada al inducido es función de la relación de fase entre Egc y Eac. Cuando Egc desfasea de Eac en casi  $180^\circ$ , la tensión aplicada al inducido es casi despreciable. Puede emplearse el control de desfase simple (1) para poner en marcha el motor (2) para servir como método de control de la velocidad por tensión de inducido, como se muestra en la figura 7.2d.

El principio del interruptor de condensador en derivación - mostrado en la figura 7.2b, al que se añade un segundo SCR para proporcionar una polarización negativa de corte mediante un condensador en carga, se muestra en la figura 7.2e, denominado circuito de potencia flip-flop de SCR. Dos motores de c.c. o dos relés de c.c. pueden ser excitados alternativamente mediante la aplicación de impulsos positivos a las entradas 1 y 2 respectivamente. Un impulso positivo a la entrada 1 conectará el motor (o relé) M1 y, simultáneamente, cargará C de tal forma que quede aplicado un potencial negativo al ánodo de SCR2.

El condensador C debe ser lo suficientemente grande para mantener el ánodo del SCR a un potencial negativo durante el tiempo en que se realiza la transición desde la regeneración a un estado estable. Cuando se aplica un potencial positivo a la entrada 2, ocurre la conducción de SCR2, conectándose M2 y cargándose simultáneamente C de tal forma que se desconecta SCR1. Este circuito también puede emplearse para conectar y desconectar un sólo motor por medio de impulsos mediante sustitución de M2 por una resistencia equivalente.

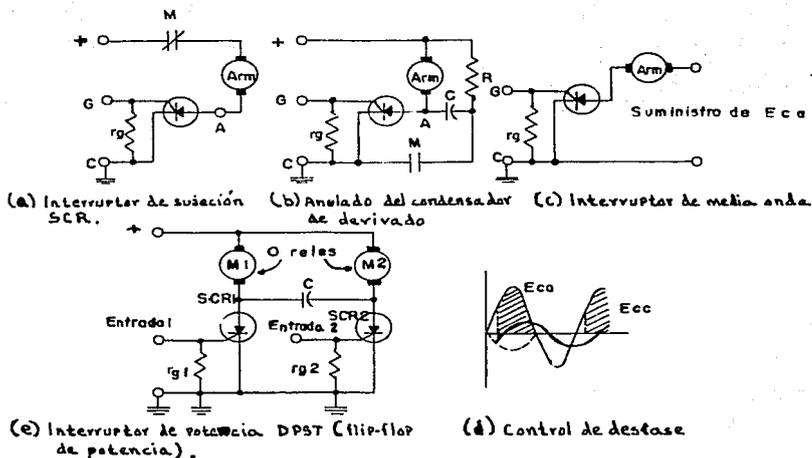


Fig. 7.2 Posibilidades de conmutación del SCR

Para reducir el rizado, o la componente de c.a. en la onda - que introduce un aumento de pérdidas en el Fe del motor, es costumbre utilizar la rectificación de onda completa en vez de la semionda. En la figura 7.3 se muestran diversos métodos de control de la tensión - de inducido de onda completa, unidireccionales, para arrancar y mante - ner en marcha un motor de c.c. desde una fuente monofásica de c.a. - El circuito de la figura 7.3a es un circuito en puente en el que dos ramas del mismo son diodos simples de estado sólido, CR1 y CR2, res - pectivamente, y las otras dos ramas del puente son SCRs. La fase de las entradas a puerta 1 y 2, respectivamente, puede regularse, por me - dio de circuitos de desfase o de disparo, para hacer posible la con - ducción idéntica en cada semi-período de la corriente alterna. Para - el funcionamiento a tensiones de c.a., más elevadas, puede emplearse - el circuito de la figura 7.3b. Este circuito sitúa el inducido del - motor de c.c. en bornes de la salida de c.c. de un puente de onda com - pleta. SCR1 y SCR2, respectivamente, se emplean simplemente como - interruptores sensibilizadores de fase que determinan la parte en que ocurre la conducción de cada semiciclo. Los impulsos aplicados a las - entradas 1 y 2 pueden regularse para producir la supresión del circui

to para el ciclo completo, para partes correspondientes idénticas de cada semiciclo, o para duraciones desiguales de cada uno de ellos.

De hecho, este procedimiento proporciona una gama de control - sobre los  $360^\circ$  de una onda de entrada de c.a. Puede emplearse circuitos de filtro LC adicionales (similares a los utilizados para fuentes de alimentación de potencia) para mejorar la naturaleza de la forma de onda de c.c. aportada desde los rectificadores de onda completa al inducido del motor. Para tensiones más elevadas, puede emplearse un transformador reductor (no mostrado en la figura 7.3b).

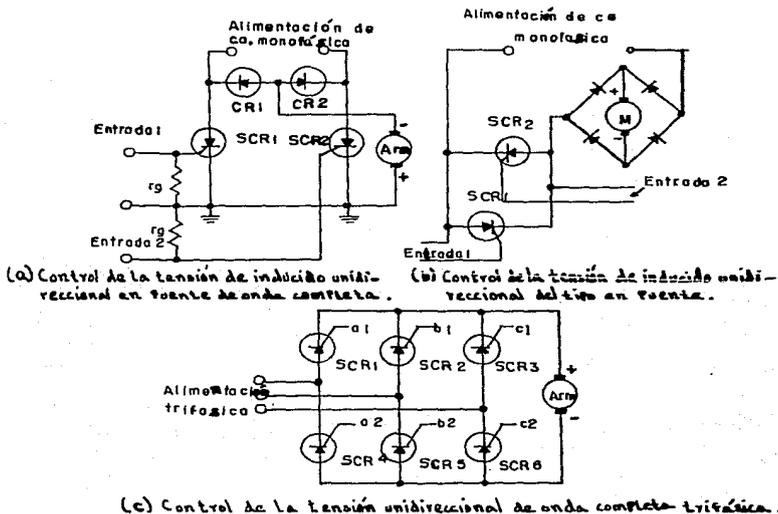


Fig. 7.3 Control de la tensión de inducido unidireccional empleando SCRs.

Pueden usarse un total de seis SCR para accionar un motor de c.c. unidireccionalmente, mediante control de tensión de inducido, desde una fuente trifásica como se muestra en la figura 7.3c. Cada par de SCR conectados en paralelo ofrece rectificación de onda completa de cada fase. La tensión de salida resultante de c.c. en paralelo tiene bastante menos rizado. Las tensiones de control a1-a2, b1-b2, y c1-c2, pueden ser desfasadas con respecto a sus tensiones entre fa-

se y neutro, o disparadas individualmente para proporcionar una suave tensión de salida de c.c. desde cero al máximo, que puede emplearse, para el control de arranque y de la velocidad por tensión de inducido.

Los SCR's numerados 4, 5 y 6 en la figura 7.3c pueden ser sustituidos por diodos de corriente y tensión equivalentes. Si las señales de disparo al, b1, c1, pueden ser desfasadas más de  $120^\circ$ , el circuito produce pleno control desde el 25 al 100 por ciento de la plena tensión y potencia de salida de c.c. Si dichas señales se desfasan más de  $180^\circ$  el circuito todavía produce el control desde 0 a 100% de plena tensión de salida c.c.

Los circuitos de la figura 7.3 se adaptan en primer lugar al arranque y al control de la velocidad donde se desee hacer girar el motor solamente en un sentido. Cuando se desee la inversión del motor, puede efectuarse bien por conmutación, bien utilizando pares de SCR's. La inversión por conmutación se muestra en la figura 7.4, mientras que la que emplea pares de onda completa se muestra en la figura 7.5

El método de conmutación mostrado en la figura 7.4 a emplea un montaje paralelo inverso de SCR's en serie con el inducido del motor de c.c. conectado a una fuente de alimentación de tensión variable de c.a. R1 y R2 son resistencias de puertas de igual valor suficientes para mantener los SCR's en estado estable, es decir, cuando ambos contactos F y R estén abiertos. Sin embargo, al cerrar el contacto F, shunta la resistencia R1 con una resistencia muy baja, R3, haciendo que el SCR1 conduzca en cada semiciclo como un rectificador de semionda desde el ánodo al cátodo.

Al abrir F y cerrarse el contacto R se producirá la conducción de SCR2 y simultáneamente llevará al SCR1 al bloqueo, puesto que no habrá corriente suficiente para producir la regeneración.

El SCR2 conduce como un rectificador de semionda desde ánodo al cátodo en el hemiciclo inverso y en sentido inverso, de tal manera que invierte la polaridad del inducido y el sentido de rotación. Un circuito desfasador también puede conectarse entre las dos puertas para hacer posible la conmutación del punto de funcionamiento de FUERA, SENTIDO DIRECTO E INVERSO, así como el control de la tensión de inducido. En el método mostrado en la figura 7.4a el control de la tensión puede obtenerse mediante variación de la entrada monofásica de c.a. por medio de un autotransformador (varia). La inductancia mostrada en serie con el inducido reduce el rizado de c.a. y limita la corriente de c.a. a través del inducido de baja resistencia y resistencia en derivación. Está diseñado y seleccionado para la saturación cuando a su través circula una corriente de c.c., de tal forma que reduce su reactancia en condiciones de marcha.

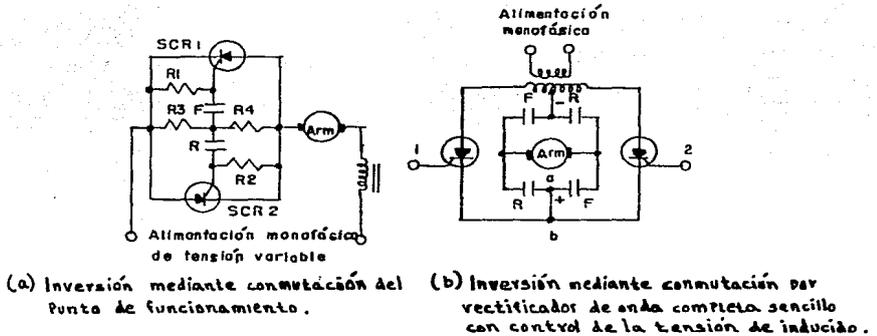


Fig. 7.4 Inversión y control de la tensión de inducido empleando SCRs (rectificación de onda completa)

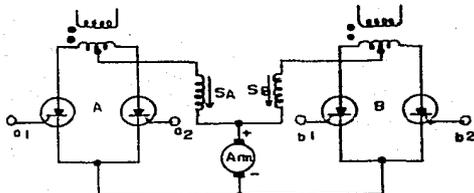
La salida de onda completa de c.c. de un par de SCRs puede conectarse en la disposición habitual de conexión de sentidos DIRECTO INVERSO para posibilitar la inversión de polaridad necesaria en el inducido, como se muestra en la figura 7.4b. En ausencia de la señal de entrada de disparo o de corriente alterna aplicada a las terminales de puerta 1 y 2, el inducido está completamente desconectado de la fuente. Al desfasar la forma de onda (de impulso o sinusoidal) de la corriente alterna de puerta, con respecto a la tensión de ca. secundaria del transformador se produce una tensión variable de c.c. de la polaridad indicada en la figura: al cerrarse sea F sea R, dará lugar a la inversión de la corriente de inducción así como a la inversión del sentido de giro. El mismo circuito de conmutación se emplea mucho para aportar corriente continua de tensión variable desde la fuente trifásica, de la forma indicada en la figura 7.4c, capaz de invertir el inducido del motor.

Los circuitos de las figuras 7.2 a 7.4 muestran solamente el inducido del motor de c.c., puesto que estos circuitos emplean control de tensión de inducido.

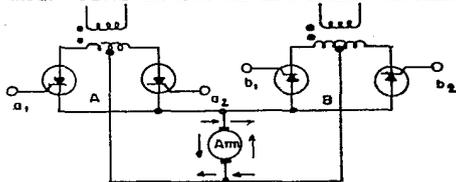
El circuito de excitación suele ser de excitación independiente desde una fuente de rectificadores de semionda u onda completa (fig. 6.1). En el caso de motores serie o compuestos, en los que se produce inversión de corriente en el inducido, la excitación debe conectarse de tal forma que se mantenga en el mismo sentido siempre que se invierta la corriente de inducido. En la figura 7.4b, por ejemplo, la excitación serie se conectaría entre los puntos a y b, en lugar del conductor.

Los motores serie de excitación desdoblada pueden controlarse mediante la conducción de onda completa de un par de SCR A o B - mostrado en la figura 7.5a. Cuando la polaridad y la fase de puerta son tales que a1-a2 ocasionan la respectiva conducción de onda completa del par A de SCR, se produce un sentido particular de giro debido a la corriente en el devanado Sa y en el inducido. Si el par A de SCR está en corte y el par B conducido a onda completa, circula el mismo sentido de corriente en el inducido, pero la corriente en la excitación serie Sb dará lugar a la rotación en sentido opuesto. Los circuitos de puerta (no mostrados) se disponen con enclavamientos adecuados para evitar la conducción simultánea de ambos pares - que podría dar lugar al embalamiento del motor debido al campo debilitado por el flujo diferencial.

El circuito de la figura 7.5b puede emplearse en cualquier - motor, derivación, serie o mixto; este circuito utiliza pares de SCR en montaje paralelo inverso, en el que cada par está diseñado para producir corriente continua de onda completa y conducir en sentido opuesto. El par A, cuando conduzca, enviará corriente de onda completa a través del inducido en sentido descendente; y el par B, en la conducción, hará circular corriente por el inducido en sentido ascendente. La tensión en bornes del inducido de cada par está determinada por la fase de la tensión de control o el impulso, con respecto a la tensión de c.a. del secundario del transformador. Este método también presenta la ventaja de no precisar de ninguna clase de contactos para invertir el sentido de giro o para aumentar la magnitud de la tensión aplicada en bornes del inducido. Esta es, en efecto, la conmutación estática y rectificación de onda completa con binadas que emplean control de tensión de inducido.



(a) Inversión y control de la tensión de onda completa empleando un motor serie de c.c. de excitación variada (desdoblada).



(b) Inversión y control de la tensión de onda completa de motor de c.c. -  
Fig. 7.5 Inversión y control de la tensión de inducido -  
empleando pares de rectificadores de onda completa

El circuito de control de tensión, trifásico, de estado sólido de onda completa, unidireccional, de la fig. 7.3c está muy generalizado para dispositivos de gobierno (conducciones) de elevada potencia que caracterizan a los motores de c.c. que se accionan en un sentido desde cero a la velocidad nominal (e incluso más elevadas empleando control de campo). Es posible invertir el sentido de rotación de este motor mediante la inversión de campo pero los inconvenientes de posible embalamiento (debido al campo abierto) y excesiva formación del arco inductivo durante la conmutación, restringen el empleo de dichos proyectos.

El diseño básico de la figura 7.3c da origen al circuito de onda completa, bidireccional, mostrado en la figura 7.6, que emplea doble número (12) de SCR's. Las entradas de desfase o de disparo - a1-a2, b1-b2 y c1-c2, darán lugar a la rectificación de onda completa de la entrada trifásica desde cero al máximo de la tensión de salida de c.c. con polaridad positiva en la escobilla superior del inducido de c.c. de la figura 7.6. Análogamente, las entradas x1-x2, y1-y2 y z1-z2, darán lugar a la rectificación de onda completa en el sentido contrario produciendo polaridad positiva en la escobilla inferior.

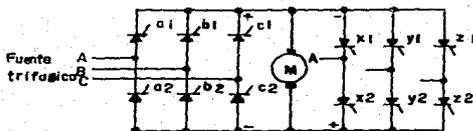


Fig. 7.6 Control de la tensión de inducido bidireccional empleando SCR's, a partir de una fuente trifásica.

Aun cuando el circuito de la fig. 7.6 tiene doble número de SCR's en comparación con el de la figura 7.3c, y a pesar de su costo más elevado, aporta dos ventajas importantes. Primera proporciona un control suave de la velocidad y con buena regulación de la misma en cualquier sentido de giro desde el reposo, sin zonas muertas. Segunda, se observará que el control unidireccional del SCR no es generalmente adecuado para sistemas que requieran generación de potencia, porque la operación queda limitada a sólo dos cuadrantes en el diagrama par-velocidad, mostrado en la figura 7.6. De esta forma, el circuito bidireccional de la figura 7.6

proporciona operación =inversora= y regeneración de potencia, así como frenado dinámico. Al efectuar comparaciones de costo se tendrán presentes las ventajas del SCR bidireccional sobre el conjunto unidireccional SCR.

La figura 7.7, efectúa una comparación entre los costes relativos de los conjuntos de control de la velocidad rotativos y los conjuntos estacionarios (estáticos) unidireccionales y bidireccionales para motores de c.c. Se observará que el conjunto bidireccional estático - SCR es, en todas las formas, el equivalente del amplificador rotativo (Ward-Leonard o amplidina) con las plusventajas de tamaño más pequeño, funcionamiento silencioso, vida más larga y mejor rendimiento. Pero - por debajo de 100 CV, la conducción estática bidireccional de c.c. - (incluyendo el circuito de desfase) es más cara que el amplificador rotativo. Recíprocamente, por encima de 100 CV, el dispositivo de gobierno bidireccional de c.c. es de coste inferior a los amplificadores rotativos para la misma graduación de potencia. Esto se aprecia en los datos indicados en la tabla 7.1, mostrando, los porcentajes relativos de los dispositivos de gobierno rotativo y de estado sólido de c.c. fabricados y vendido en los EE.UU. en un reciente estudio.

Conducción	Grupo MG (Ward Leonard) o Amplidina	SCR unidireccional de onda completa, trifásico	SCR bidireccional de onda completa, trifásico
Circuito detallado	Fig 6-2b	Fig 7-3a	Fig 7.5
Representación esquemática			
Potencia Transmiteda: Par-Velocidad			
Velocidad y control de Pasición	Universal (de cero a la nominal, en cualquier sentido)	Solamente control en 2 cuadrantes. Conmutación de f. en reguervia para el control	Universal
Factor de coste normalizado	1,0	Mayor que 1,0 a cualquier potencia (en hp)	Inferior a 1,0HP más de 1,0 Por encima de 100 HP inferior a 1,0

Fig. 7.7 Comparaciones entre las condiciones de motores de c.c. rotativas y de estado sólido.

La tabla 7.1 muestra la fabricación reducida de los grupos rotativos MG en la gama de 100 CV a 1000 CV debido a la reciente competencia de los dispositivos de gobierno estáticos de SCR, a los cuales corresponde el porcentaje más elevado (25 por ciento) de todas las conducciones estáticas. Obsérvese que los grupos rotativos MG todavía dominan el campo de potencia muy elevada (desde 1000 CV a 10 000 CV) a pesar de la disponibilidad de ignitrones y tiratrones, así mismo como rectificadores de vapor de mercurio, que podrían utilizarse preferentemente a los amplificadores rotativos. Obsérvese también que los dispositivos de gobierno estáticos de c.c. de estado sólido cubren corrientemente una gama más amplia de potencia que los amplificadores rotativos. Los últimos se prefieren en general y principalmente en las gamas de potencia más elevadas, por encima de 1 000 CV.

**PORCENTAJES DE LOS DIVERSOS TIPOS DE CONDUCCIONES VENDIDAS, COMO PARTES DE SISTEMAS ESPECIALES, SEGUN LOS HP NOMINALES**

TIPO DE CONDUCCION	GAMA DE POTENCIA EN HP					
	01 %	1-9 %	10-24 %	25-99 %	100-999 %	1000-10000 %
SCR, estático, de c.c.	4	17	18	18	25	18
Grupo MG, rotativo	0	15	13	20	13	39

Tabla 7.1

Es de esperar que los perfeccionamientos en los dispositivos y en la tecnología de estado sólido irán extendiendo el reemplazamiento de los amplificadores rotativos por grupos prefabricados de estado sólido, de control estático de los motores c.c.

**VII. 2 FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES DE C.C. CON RECTIFICACION ELECTRONICA.**

La componente de c.a. de la corriente en un rectificador monofásico de semionda excede a la de un rectificador de onda completa que a la vez es mayor que la de un rectificador de semionda u onda completa trifásico. De esta forma, la rectificación de onda completa trifásica o hexafásica producirá una componente de c.a. de rizado

más pequeña que la rectificación monofásica. Además, como que la tensión - de disparo está desfasada de forma que la reactancia saturable, el amplificador magnético, el tiratrón, el ignitrón, o el SCR, producen la conducción - sobre una parte muy pequeña del ciclo total de c.a., también se incrementa - el rizado. Cuando se emplea con el control polifásico de c.a. de onda completa, se acostumbra a rebajar la potencia de régimen de los motores de c.c. a un 90 por ciento de su potencia nominal en servicio permanente. La potencia de los motores monofásicos accionados puede rebajarse hasta un 70 por - ciento. De esta forma, un motor de c.c. de potencia equivalente utilizando un procedimiento electrónico de control de la velocidad, resulta físicamente mayor en tamaño.

Las razones para rebajar la potencia de régimen son: (1) aumento de las pérdidas en el Fe producidas por el aumento de rizado de c.a.; (2) - las dificultades de conmutación producidas por la elevada componente de c.a. haciendo menos eficaces los polos de conmutación (puesto que precisan de - c.c.), originando sobrecalentamientos y chispas en el conmutador, y (3) más sobre regulación de la velocidad, producida por la impedancia de la c.a. en bornes del rectificador y del inducido, dando lugar a una velocidad más pequeña y refrigeración menos eficaz del motor. Este inconveniente puede ser eliminado, sin embargo, mediante procedimientos en bucle cerrado que sensibilizan y mantienen la regulación de la velocidad.

A pesar de la disminución de la potencia de régimen y de una regulación más pobre de la velocidad en bucle abierto que caracteriza a algunos métodos electrónicos de control de la velocidad, las ventajas de los reguladores más pequeños y ligeros, que no requieren relés o contactores, junto con la forma en que pueden adaptarse fácilmente a los servosistemas en - bucle cerrado y las plusposibilidades de conmutación de estado sólido, todas ellas han conducido a una amplia utilización de este método de control.

Los dispositivos de gobierno de semionda presentan la ventaja de ser de diseño y de mantenimiento relativamente sencillos, así como de coste relativamente bajo en comparación con los dispositivos de gobierno de onda completa o trifásicos. Los inconvenientes de los dispositivos de gobierno de semionda son:

1. Saturación del transformador de alimentación, por la componen - te de c.c. de la corriente de línea originada por el motor.

2. A cargas fuertes y bajas velocidades, el motor tiende a produ - cir un par desigual durante un ciclo completo, dando lugar a pulsaciones de potencia audibles puesto que ésta se aplica una vez por ciclo y desigual ve - locidad del motor.

3. La potencia de régimen del motor debe ser rebajada (hasta un 70 por ciento) porque la corriente presenta un elevado valor eficaz en promedio, debido a los ángulos de conducción relativamente pequeños, empleando rectificación de semionda. El empleo de un diodo Zener (denominado diodo - de rueda libre) en bornes del inducido se traduce en una mejora de la opera - ción.

4. Por las razones anteriores los dispositivos de gobierno de - semionda quedan limitados a motores de c.c. de aproximadamente 1 CV.

Los dispositivos de gobierno monofásicos, de onda completa, se encuentran en el comercio para funcionamiento a 115 V y 230 V, para motores de 1, 1.5, 2.3 y 5 CV. Aun cuando son algo más caros debido al gran número de rectificadores o SCRs empleados, no adolecen de los inconvenientes descritos antes para los dispositivos de gobierno. Las velocidades básicas normalizadas para dichos dispositivos son 1 150, 1 750, 2 500 y 3 500 r.p.m. con variación de la velocidad de hasta el 20/1 al par nominal y casi el 100/1 a pares reducidos ligeros. Los sistemas comerciales de dispositivos de mando regulables de velocidad/pares, que emplean un tipo de sistema sensibilizador de realimentación de la tensión de inducido como medida de la velocidad de salida son capaces de regulaciones de la velocidad del 3 por ciento, a la velocidad básica. Utilizando procedimientos sensibilizadores de la velocidad por tensión mediante tacómetro, se pueden conseguir regulaciones de la velocidad de hasta el 0,1 por ciento. Además del control de la velocidad, los grupos prefabricados también incluyen opciones tales como, frenado dinámico, inversión - ajuste de la velocidad, limitación de la aceleración y extensión de la gama de velocidades por debilitación de campo.

Corrientemente se pueden conseguir dispositivos de gobierno trifásico para motores de 1 hasta 150 CV. los diseños más recientes funcionan a 230 ó 460 V, con alimentaciones trifásicas, eliminación de transformadores y adaptando la tensión del motor de c.c. al valor de la tensión máxima rectificada. Como se muestra en la figura 7.8 pueden emplearse los circuitos de doble senoonda para la inversión. La bobina de reactancia del inducido, L, en serie con el mismo, tiene de a reducir el rizado y a eliminar la necesidad de reducir la potencia de régimen del motor debido al excesivo calentamiento. La bobina de reactancia puede ser eliminada y no necesitará reducir la potencia si se emplea el puente de onda completa bidireccional mostrado en la figura 7.6. Sin embargo, este último presenta el inconveniente de utilizar doble número de SCRs.

En los valores nominales de potencia más elevados (100 CV y mayores) los puentes de SCR del tipo paralelo se emplean para proporcionar el valor nominal requerido de la corriente. Los grupos prefabricados comerciales aportan aproximadamente la misma (o mejor) regulación de la velocidad y disposiciones opcionales como las descritas antes para las conducciones monofásicas de onda completa. Las velocidades básicas estándar incluyen 850 r.p.m. además de las descritas antes para conducciones monofásicas de onda completa. Finalmente, según se indica en la figura 7.7., las conducciones trifásicas de onda completa, de 100 CV, son corrientemente menos caras, más ligeras de peso, y requieren menos espacio que los amplificadores rotativos.

Además, su funcionamiento relativamente silencioso hace posible menor restricción y mayor versatilidad al seleccionar emplazamientos para su instalación.

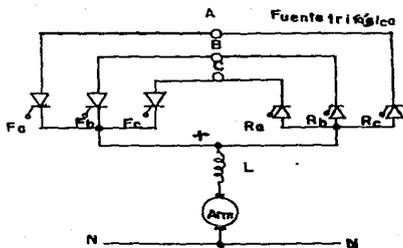


Fig. 7.8 Control bidireccional de la tensión de inducido empleando un puente de semionda trifásico y bobina de reactancia en serie.

## CAP. VIII APLICACIONES DEL MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA (C.D.)

### VIII. 1 MOTOR EN DERIVACIÓN (SHUNT)

El motor shunt es empleado, sobre todo, cuando se pretende - una velocidad variable al mismo tiempo que una gran estabilidad en la marcha. La velocidad puede variar de simple a doble con la sencilla maniobra del redstato de excitación (y también de simple a triple con -- una conmutación apropiada) y, para una corriente de excitación determinada, la velocidad disminuye muy poco cuando la carga aumenta (baja aproximadamente de 5% a la plena carga). El motor shunt a dado su nombre a esta característica de velocidad; un motor posee una característica - shunt cuando la velocidad es prácticamente constante, tal, por ejemplo, como en el motor asíncrono.

El par de arranque del motor shunt, es bastante bueno y la - intensidad de arranque no es excesiva.

Otra característica que le hace muchas veces ser preferido al motor asíncrono radica en la propiedad del motor shunt de que, alimentado a tensión constante bien determinada, puede establecerse para funcionar a cualquier velocidad. Esto no ocurre en el motor asíncrono, cuya velocidad depende de la frecuencia de la red de alimentación y del número de polos del bobinado; por ejemplo, para la frecuencia de 50 HZ no puede haber velocidad comprendida entre 1500 y 3000 rev/min. En el caso de un - acoplamiento directo impuesto, una máquina que deba funcionar a 2000 o - 2500 rev/min. deberá ser accionada por un motor shunt.

Las aplicaciones más usuales que se le dan al motor de corriente directa shunt son las siguientes:

- a) Tornos, fresadoras, taladradoras, máquinas de cepillar, - etc.
- b) Compresores
- c) Acensores
- d) Gatos
- e) Mezcladoras y cilindras para caucho
- f) Máquinas para el papel
- g) Ventiladores

### VIII. 2 MOTOR EN SERIE

El motor serie posee un buen par de arranque (el par de arranque que puede alcanzar cuatro veces el par normal, para  $i_d = 2 I_n$ , mientras que el par de arranque de un motor asíncrono sólo es, como máximo el doble del par normal). Con una intensidad de arranque aceptable.

Su velocidad es función de la carga y crece cuando ésta baja, pero puede embalsarse a vacío, y ello limita su empleo. Esta variación de velocidad con la carga no siempre es un inconveniente: por ejemplo, en los aparatos elevadores es interesante poder maniobrar las pequeñas cargas a velocidad elevada y las grandes cargas a velocidades más lentas; en este caso es indicado el motor serie.

Las aplicaciones más usuales que se le dan al motor serie son las siguientes:

- a) Tracción eléctrica
- b) Aparatos de elevación
- c) Grúas
- d) Laminadores
- e) Diferenciales
- f) Bombas con embolo
- g) Sirenas
- h) Transportadores por cable
- i) Ventiladores, Etc.

### VIII. 3 MOTOR COMPUESTO (COMPOUND)

El motor compound de flujos aditivos posee propiedades intermedias a las del motor shunt y las del motor serie. Su velocidad será tanto más regular, cuando el flujo shunt sea más predominante. Si, por el contrario, predomina el flujo serie, su velocidad varía con la carga, pero su par de arranque es muy elevado.

Las aplicaciones más usuales que se le dan al motor compound son las siguientes:

- a) Aparatos de elevación
- b) Molinos
- c) Calandras
- d) Cabrestantes
- e) Cizallas
- f) Frigoríficos
- g) Prensas de embutir
- h) Gatos, etc.

## B L I B L I O G R A F I A

- I. Máquina eléctrica "Estado dinámico y permanente".  
George J. Thaler y Milton L. Wilcox.  
Editorial: Limusa.
- II. Máquina eléctrica y transformadores.  
Irving L. Koson.  
Editorial: Reverté.
- III. Control de Motores eléctricos.  
R.E. Mc Intyre.  
Editorial: Marcombo.
- IV. Circuitos electrónicos integrados.  
"AMICEE"  
(Asociación Mexicana de Ingenieros en Comunicación, eléctrica y electrónica.
- V. Manual para Ingenieros en Electrónica.  
Milton Kaufman y Artur H. Seidman  
Editorial: Mc. Graw Hill.
- VI. Problemas de Electricidad.  
H. y W. Vieweger.  
Editorial: Gustavo Gili.
- VII. Manual practico de COVESA (control de velocidad S.A.)
- VIII. El electricista de Fábrica.  
E. Maurein,  
Editorial: Gustavo Gili.
- IX. Manual practico de reliance eléctrico Inc.