

Motores de Corriente Continua

20

Introducción

Los motores eléctricos son máquinas eléctricas rotativas que transforman la energía eléctrica en mecánica.

Los motores de corriente continua presentan el inconveniente de que sólo pueden ser alimentados a través de equipos rectificadores que conviertan la corriente alterna suministrada por la red eléctrica en corriente continua. Por otro lado, su construcción es mucho más compleja que los de C.A. y al igual que las dinamos necesitan de colectores de delgas y escobillas para su funcionamiento, que aumentan considerablemente los trabajos de mantenimiento. En contrapartida, poseen un par de arranque elevado y su velocidad se puede regular con facilidad entre amplios límites, lo que los hace ideales para ciertas aplicaciones: tracción eléctrica (tranvías, trenes, coches eléctricos, etc.) y en todos aquellos casos en que sea muy importante el control y la regulación de las características funcionales del motor.

Contenido

- ✓ Principio de funcionamiento de una motor de C.C.
- ✓ Constitución de un motor de C.C.
- ✓ Reacción del inducido.
- ✓ Comportamiento en servicio.
- ✓ Arranque.
- ✓ Par motor, velocidad, fuerza contraelectromotriz e intensidad en el inducido.
- ✓ Inversión del sentido de giro.
- ✓ Motor de excitación independiente.
- ✓ Motores autoexcitados.
- ✓ Regulación y control de motores de C.C.
- ✓ Ensayos y curvas características de los motores.

Objetivos

- ✓ Describir el funcionamiento del motor de C.C.
- ✓ Seleccionar las características de un motor de C.C. para una determinada aplicación práctica.
- ✓ Analizar el funcionamiento de un motor en función de su tipo de excitación.
- ✓ Describir los tipos de ensayos fundamentales y normalizados que se deben realizar con los motores, identificando las magnitudes que se deben medir y explicando las curvas características que relacionan dichas magnitudes.

20.1 Principio de funcionamiento

Como todos los motores eléctricos, su funcionamiento se basa en las fuerzas que aparecen en los conductores cuando son recorridos por corrientes eléctricas y, a su vez, están sometidos a la acción de un campo magnético.

En la Figura 20.1 se ha representado el aspecto de un motor de corriente continua elemental. Los polos magnéticos del imán, situados siempre en el estator, son los encargados de producir el campo magnético inductor. La espira, que se ha situado en el rotor, es recorrida por una corriente continua que se suministra a través de un anillo de cobre cortado por la mitad (colector de delgas). Las dos mitades se aíslan eléctricamente y se sitúan sobre ellas unos contactos deslizantes de carbón (escobillas), de tal forma que la corriente aplicada por la fuente de alimentación pueda llegar a los conductores del rotor.

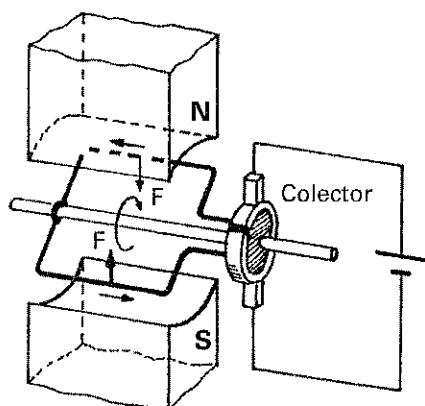


Figura 20.1. Motor de C.C. elemental.

Como las corrientes que circulan por ambos lados de la espira son contrarias, al aplicar la regla de la mano izquierda, podemos comprobar que aparecen fuerzas también contrarias en cada lado activo de la espira, lo que determina un par de giro. Para que el sentido de giro sea siempre el mismo, el par de fuerzas siempre deberá actuar en el mismo sentido. En el caso de que los conductores de la espira girasen hasta enfrentarse con el polo contrario, con el mismo sentido de corriente que en la anterior posición, la fuerza se invertiría de sentido y la espira no establecería nunca una revolución. Con el colector de delgas se resuelve este problema, haciendo que la corriente siempre circule en el mismo sentido respecto al campo magnético (observa cómo el colector consigue ir conmutando los circuitos de ambos lados activos de la espira cada media vuelta).

Para conseguir que el motor gire en uno u en otro sentido hay que lograr invertir el sentido del par de fuerzas. Esto se consigue invirtiendo el sentido de la corriente del rotor y manteniendo fijo el campo magnético inductor.

20.2 Constitución

La constitución de motor de C.C. es exactamente igual que la de un generador de corriente C.C. (dinamo). Esta máquina es reversible y, por lo tanto, puede funcionar indistintamente como motor o como generador. Como hemos podido compro-

bar en el motor elemental, se necesitan de tres partes fundamentales para su funcionamiento: un circuito que produzca el campo magnético (circuito inductor), un circuito que al ser recorrido por la corriente eléctrica desarrolle pares de fuerza que pongan en movimiento el rotor (circuito inducido) y un colector de delgas con escobillas.

20.3 Reacción del inducido

Al igual que ocurría con el generador de C.C., al pasar la corriente por el inducido del motor se desarrolla un campo magnético transversal que desvía de su posición original al campo principal inductor, produciéndose el fenómeno conocido de chispas en el colector. Para reducir el efecto perjudicial de la reacción del inducido también se utilizan polos de conmutación conectados en serie con el inducido. En el caso de querer invertir el sentido de giro del motor, se invierte tanto la polaridad de la corriente por el inducido como la de los polos de conmutación.

En el caso de optar por la desviación de las escobillas, habrá que hacerlo en sentido contrario al giro del motor.

20.4 Comportamiento en servicio

Cuando la corriente recorre los conductores del inducido de un motor de corriente continua, se produce un par de giro en el rotor, lo que da lugar a que el motor, en un proceso de arranque, empiece acelerarse hasta alcanzar sus revoluciones nominales. La corriente que aparece en el inducido dependerá, sobre todo, de la fuerza contraelectromotriz que se desarrolle en el inducido del mismo. Seguidamente estudiaremos la relación que existe entre todas estas variables.

20.5 Fuerza contraelectromotriz

Cuando el motor gira, impulsado gracias al par de giro desarrollado por los conductores del inducido cuando son recorridos por una corriente, dichos conductores cortan en su movimiento a las líneas de campo magnético del inductor, lo que hace que se induzca en ellos una fuerza electromotriz (es como si el motor se comportase como un generador de C.C. cuando gira). El sentido de dicha fuerza electromotriz es tal que, según la ley de Lenz, tiende a oponerse a la causa que la produjo. Es decir, a la corriente del inducido y a la tensión aplicada al motor.

Esta f.e.m., llamada fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.), produce un efecto de la limitación de la corriente del inducido.

El valor de la fuerza contraelectromotriz se calcula exactamente igual que la f.e.m. de una dinamo:

$$E = K_1 N\Phi$$

La fuerza contraelectromotriz es proporcional al flujo inductor y al número de revoluciones del motor.

20.6 Corriente del inducido

Cuando el motor trabaja en vacío, el par motor originado por los conductores del inducido provoca un aumento de la velocidad del rotor debido a la poca resistencia que encuentra. Este aumento de velocidad produce, a su vez, una mayor f.c.e.m. que limita la corriente del rotor a valores de corriente de vacío. Cuando el motor arrastra una carga mecánica, la velocidad tiende a decrecer, con lo cual disminuye la f.c.e.m. y la corriente aumenta, elevándose con ella el par de fuerzas.

La corriente que el motor absorbe depende del trabajo mecánico que tenga que realizar.

Para determinar el valor de esta corriente aplicamos la ley de Ohm y la segunda ley de Kirchhoff:

$$I_i = \frac{V_b - E - 2 U_e}{r_i}$$

I_i = corriente del inducido (A)

V_b = tensión aplicada al inducido (V)

E = f.c.e.m. (V)

$2 U_e$ = caída de tensión de las escobillas (V)

r_i = resistencia del inducido (Ω)

20.7 Corriente absorbida en el arranque

En el primer momento de arranque de un motor, el rotor está parado y, por tanto, la f.c.e.m. es nula. La corriente sólo queda limitada por la pequeña caída de tensión de las escobillas, que suele ser del orden de 2 V, y por la pequeña resistencia del inducido (menor a 1 Ω).

$$I_{i \text{ (arranque)}} = \frac{V_b - 2 U_e}{r_i}$$

La corriente absorbida por el motor en el arranque es muy elevada.

Cuando se conecta el motor directamente a la red, éste absorbe una intensidad muy fuerte de la línea en el momento del arranque, lo que puede afectar no sólo a la duración de los aparatos de conexión, sino a la líneas que suministran energía eléctrica. Estas fuertes corrientes sobrecargan las líneas de distribución, pudiendo producir caídas de tensión y calentamiento en los conductores de las mismas. Por esta razón, las compañías de energía indican normas para reducir dichas corrientes de arranque a valores que sean aceptables.

El arranque directo está permitido para motores que posean una potencia inferior a 5,5 Kw.

En un motor de corriente continua es muy simple limitar la corriente hasta valores aceptables, intercalando resistencias adicionales en serie con el inducido, tal como se muestra en la Figura 20.2.

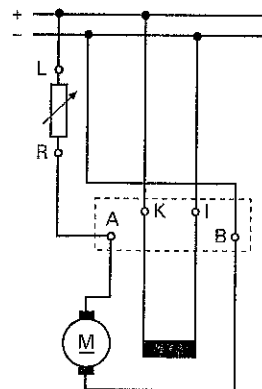


Figura 20.2. Esquema de conexiones del reostato de arranque de un motor de C.C.

El procedimiento de arranque se realiza de tal forma que según el motor aumenta su velocidad, se va disminuyendo el valor de las resistencias adicionales de arranque.

Ejemplo: 20.1

Un motor de C.C. posee una resistencia interna en el inducido de 0,15 Ω , siendo la caída de tensión de las escobillas de unos 2V. Determina la corriente absorbida por el motor en el arranque si se le conecta a una tensión de 100 V. ¿Cuál será la corriente de arranque de este motor si se conecta en serie con el inducido una resistencia adicional de 3 Ω ?

Solución: La intensidad absorbida antes de que el motor comience a moverse, es:

$$I_{i(a)} = \frac{V_b - 2 U_e}{r_i} = \frac{100 - 2}{0,15} = 653 \text{ A}$$

Al conectar en serie con el inducido la resistencia adicional, se aumenta artificialmente la resistencia del inducido y la corriente queda limitada:

$$I_{i(a)} = \frac{100 - 2}{0,15 + 3} = 31 \text{ A}$$

Ejemplo: 20.2

Se dispone de un motor de C.C. con excitación independiente de las siguientes características: 8 KW; 220 V; resistencia del inducido = 0,23 Ω ; caída de tensión de las escobillas = 2 V. Determinar la corriente de arranque directo del motor. ¿Qué valor deberá poseer la resistencia adicional a conectar en serie con el inducido si se desea limitar la corriente de arranque a 2,5 veces la intensidad nominal?

Solución: La intensidad en el arranque sin resistencias adicionales, es:

$$I_{i(a)} = \frac{V_b - 2 U_e}{r_i} = \frac{220 - 2}{0,23} = 948 \text{ A}$$

La corriente nominal del motor:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{8.000}{220} = 36 \text{ A}$$

La corriente de arranque deberá limitarse hasta:

$$36 \text{ A} \cdot 2,5 = 90 \text{ A}$$

El valor de la resistencia adicional r_a la obtenemos a partir de la expresión correspondiente a la intensidad de arranque:

$$I_{i(a)} = \frac{V_b - 2 U_e}{r_i + r_a} \Rightarrow r_a = \frac{V_b - 2 U_e - I_{i(a)} r_i}{I_{i(a)}} = \frac{220 - 2 \cdot 90 \cdot 0,23}{90} = 2,2 \Omega$$

20.8 Rendimiento de un motor eléctrico

En muchas ocasiones no se conoce la potencia eléctrica que el motor toma de la red eléctrica para su funcionamiento. Sin embargo, sí conocemos la potencia útil que el mismo puede entregar por su eje y el rendimiento con el que lo hace, por ejemplo, 5 CV con un rendimiento del 85% ($\eta = 85\%$); ¿cuál es la potencia eléctrica que el motor tiene que absorber de la red en este caso?

Llamaremos P a la potencia eléctrica activa que el motor toma de la red eléctrica y P_u a la potencia útil o mecánica que el motor va a desarrollar en su eje. De la diferencia de estas potencias obtendremos la potencia perdida en el motor P_p :

$$P_p = P - P_u$$

La potencia se pierde, por un lado, por efecto Joule al pasar la corriente por los conductores de los bobinados ($R I^2$), por otro, por rozamientos en los rodamientos y en la ventilación y, por otro, en los circuitos magnéticos: histéresis y corrientes parásitas.

El rendimiento de un motor indica la relación porcentual que existe entre la potencia útil del motor y la potencia total o eléctrica, es decir:

$$\eta = \frac{P_u}{P} \cdot 100$$

En nuestro ejemplo, la potencia eléctrica que el motor absorbe de la red, es:

$$P = \frac{P_u}{\eta} \cdot 100 = \frac{5 \cdot 736}{85} \cdot 100 = 4.239 \text{ W}$$

¿Cuál es la potencia perdida en este caso?

Ejemplo: 20.4

Un motor de C.C. posee una potencia útil de 10 CV, $\eta = 87\%$, 400 V. Determinar la potencia eléctrica tomada de la alimentación, así como la corriente que absorbe.

Solución:

$$P = \frac{10 \cdot 736}{87} \cdot 100 = 8.460 \text{ W}$$

$$P = V_b I \Rightarrow I = \frac{P}{V_b} = \frac{8.460}{400} = 21 \text{ A}$$

20.9 Par motor

En los conductores del rotor de un motor aparecen una serie de fuerzas de origen electromagnético que producen una par de fuerzas C . Este par interno se encarga de hacer girar el rotor con la carga mecánica a mover.

El par de rotación se obtiene del producto de la fuerza por el radio (Figura 20.3).

$$C = F \cdot r$$

C = par en newton · metro (Nm)

F = fuerza en newtons (N)

r = radio en metros (m)

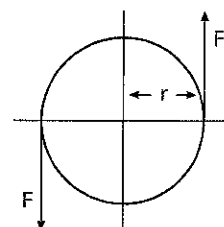


Figura 20.3. Par de fuerzas.

Ejemplo: 20.5

Determinar el par de rotación de un motor que posee un rotor con un diámetro de 0,20 metros y desarrolla una fuerza de 400 newtons.

$$\text{Solución: } C = F \cdot r = 400 \cdot 0,10 = 40 \text{ Nm}$$

El par de rotación útil producido por el motor también se puede expresar como la relación existente entre la potencia útil desarrollada en el rotor y la velocidad angular del mismo.

$$C = \frac{P_u}{\omega}$$

C = par en Nm

P_u = potencia útil del motor en W

ω = velocidad angular en rad/s

Para calcular la velocidad angular del rotor partiendo de su velocidad de rotación en revoluciones por minuto (r.p.m.) se utiliza la siguiente expresión:

$$\omega = \frac{2 \pi n}{60}$$

Ejemplo: 20.6

La potencia útil de un motor eléctrico es de 8 CV. Determinar el par útil de rotación de dicho motor a plena carga, así como la fuerza media que impulsa a girar al rotor si éste posee un diámetro de 28 cm y gira a una velocidad de 2.935 r.p.m.

Solución: La velocidad angular del rotor, es:

$$\omega = \frac{2 \pi n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2.935}{60} = 307 \text{ rad/s}$$

Como cada caballo de vapor equivale aproximadamente a 736 W, el par útil es igual a:

$$C = \frac{P_u}{\omega} = \frac{8 \cdot 736}{307} = 19 \text{ Nm}$$

La fuerza media en el rotor del motor:

$$C = F \cdot r \Rightarrow F = \frac{C}{r} = \frac{19}{0,14} = 136 \text{ N}$$

El par motor que desarrollan los conductores del inducido al ser recorridos por la corriente dependerá, según la ley de Laplace, del valor de dicha corriente y del flujo desarrollado por el campo inductor. La expresión que relaciona el par con estas variables en un motor de C.C., es:

$$C = \frac{n p}{2 \pi a} \Phi I_i$$

Como los términos n , p y a son constantes \Rightarrow

$$C = K_2 \Phi I_i$$

El par motor es proporcional a la corriente del inducido y al flujo del campo magnético inductor.

20.10 Velocidad de giro

La velocidad de giro de un motor de corriente continua la podemos determinar combinando las ecuaciones de la f.c.e.m. y la de la corriente eléctrica. No teniendo en cuenta la caída de tensión producida por las escobillas, la velocidad adquiere la siguiente expresión:

$$N = \frac{V_b - r_i I_i}{K_1 \Phi}$$

La velocidad de giro de un motor de C.C. aumenta con la tensión aplicada, al disminuir la corriente del inducido y al disminuir el flujo producido por el campo inductor.

A partir de esta expresión se puede comprender el comportamiento del motor para una determinada carga y desarrollar sistemas de regulación de velocidad.

La regulación de velocidad de un motor se puede hacer de dos formas diferentes; manteniendo constante el flujo y variando la tensión aplicada al inducido o manteniendo constante la tensión y variando el flujo de la excitación. Este último sistema es el más empleado por su sencillez, ya que es suficiente con intercalar un resistencia variable (reostato de campo) en serie con el circuito que alimenta al devanado encargado de producir el campo magnético inductor, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 20.4. Si se disminuye el flujo mediante el reostato de campo, la velocidad aumenta y viceversa.

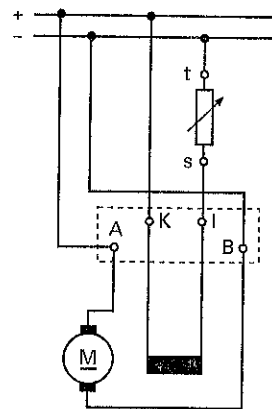


Figura 20.4. Esquema de conexiones de reostato de campo para la regulación de velocidad de un motor de C.C.

20.11 Conexión de los motores de corriente continua

Por lo general, el campo magnético inductor o excitación de los motores de C.C. se produce con devanados dispuestos en las piezas polares y que generan dicho campo cuando son recorridas por la corriente eléctrica. Dependiendo de como se conecte el devanado de excitación respecto al inducido, al igual que ocurre con los generadores, se consiguen diferentes tipos motores: motor de excitación independiente, motor de

excitación en derivación o shunt, motor de excitación en serie y motor de excitación compound.

20.11.1 Motor con excitación independiente

En los motores con excitación independiente, el devanado de excitación se conecta a una fuente de tensión diferente a la aplicada al inducido, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 20.5. En la placa de características es necesario indicar tanto la tensión del inducido como la de la excitación. Las características de funcionamiento son similares a la del motor con excitación en derivación, por lo que no insistiremos en su estudio.

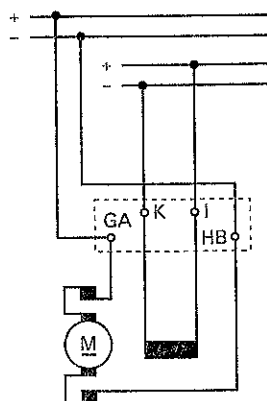


Figura 20.5. Esquema de conexiones de motor de C.C. con excitación independiente.

La separación de la excitación aporta la ventaja de mayores posibilidades de regulación de velocidad que el motor derivación. Gracias al avance de las nuevas tecnologías, hoy en día se fabrican equipos electrónicos para el arranque y control de motores de corriente continua. Dada la posibilidad que poseen estos equipos de controlar separadamente diferentes variables, en combinación con motores de excitación independiente presentan innumerables ventajas.

20.11.2 Motor con excitación derivación o shunt

En el motor shunt el devanado de excitación se conecta en paralelo con el inducido. El devanado de los polos de conmutación se conecta en serie con el inducido. En la Figura 20.6 se puede apreciar las conexiones de la placa de bornes de un motor de corriente continua con polos de conmutación. Se ha incluido una reostato para limitar la corriente de arranque del inducido, y otro para poder regular el campo magnético inductor de la excitación.

Característica de velocidad. La característica de velocidad indica la relación que existe entre la velocidad del motor y la corriente del inducido. Recordemos que la expresión general de velocidad es:

$$N = \frac{V_b - r_i I_i}{K_1 \Phi}$$

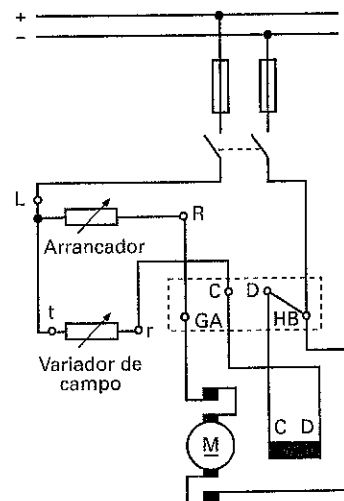


Figura 20.6. Esquema de conexiones de motor de C.C. con excitación en derivación.

Si se mantiene constante el campo magnético, como la tensión aplicada por la red (V_b) también lo es, la velocidad sólo depende de la caída de tensión del inducido ($r_i I_i$).

Dado que el término $r_i I_i$ es muy pequeño, la velocidad tiende a disminuir un poco al aumentar la carga (curva c) (Figura 20.7). Por otro lado, cuando aumenta la intensidad del inducido, la reacción del inducido reduce el flujo del campo resultante, tendiendo a aumentar la velocidad con la carga (curva a). En conclusión, la velocidad de un motor con excitación en derivación permanece prácticamente constante para cualquier régimen de carga, tal como se puede apreciar en la curva característica $N = f(I_i)$ de la Figura 20.7 (curva b).

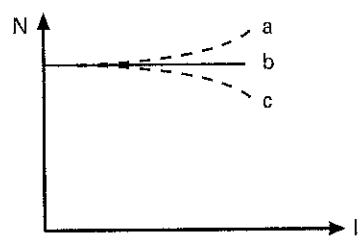


Figura 20.7. Característica mecánica de un motor derivación. $N = f(I_i)$.

En máquinas de gran potencia, cuando se trabaja a regímenes de carga elevados, la reacción del inducido provoca un debilitamiento considerable del campo principal, lo que hace que el motor tienda a elevar su velocidad y funcione inestablemente. Para evitar esto se incorpora el devanado de compensación que evita la distorsión y el debilitamiento del campo. Dado el alto precio que este sistema de compensación conlleva, sólo se utiliza para máquinas de gran potencia.

La regulación de velocidad de un motor derivación entre amplios límites se consigue, con facilidad, regulando la corriente de excitación mediante un reostato de campo conectado en serie con el devanado de excitación, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 20.6.

Característica del par motor. Relaciona el par motor en función de la intensidad de corriente del inducido, $C = f(I_i)$.

Teniendo en cuenta que la expresión del par es la siguiente:

$$C = K_2 \Phi I_i$$

Si el flujo permanece constante, el par es directamente proporcional a la corriente del inducido.

En la Figura 20.8 se puede apreciar la curva característica del par motor $C = f(I_i)$ de un motor con excitación en derivación.

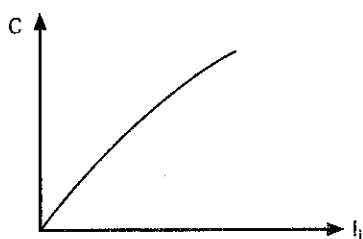


Figura 20.8. Característica del par motor de un motor derivación.

Característica mecánica. Esta característica relaciona el par motor en función de la velocidad $C = f(N)$. La curva característica correspondiente se puede obtener a partir de las otras dos. Se puede decir que esta característica es la más representativa del funcionamiento del motor, ya que con ella podemos determinar la velocidad de giro del motor para un determinado par resistente aplicado al motor.

Si consideramos que el flujo magnético permanece constante, el par motor permanece también constante con la velocidad. El resultado se ha representado en la curva que se muestra en la Figura 20.9.

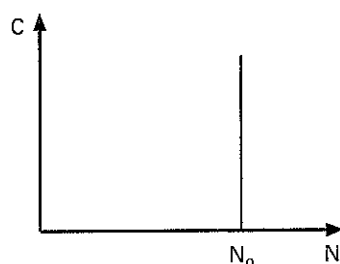


Figura 20.9. Característica mecánica de un motor derivación.

En resumen, en el motor con excitación derivación, la velocidad se mantiene relativamente constante para cualquier régimen de carga. Cuando se aumenta el par resistente aplicado al motor, la corriente del inducido aumenta para producir un par motor igual al mismo.

Dada la estabilidad que permite el motor derivación, posee un campo de aplicación bastante amplio, como por ejemplo, en máquinas, herramientas para metales, madera, plásticos, etc.

20.11.3 Motor con excitación en serie

En estos motores se conecta el devanado de excitación en serie con el inducido. En la Figura 20.10 se ha representado el esquema de conexiones de un motor serie con devanado de compensación, polos de conmutación y reostato de arranque.

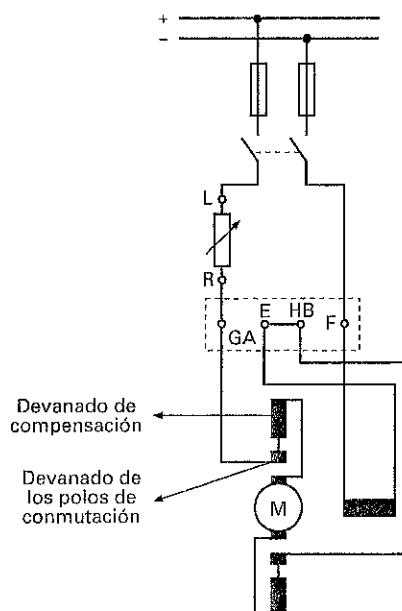


Figura 20.10. Esquema de conexiones de un motor de C.C. con excitación en serie.

Característica de velocidad. La particularidad más importante a observar es que la corriente de excitación es la misma que la del inducido:

$$I_i = I_{ex.}$$

Como el flujo del campo magnético inductor es proporcional a la corriente de excitación, éste depende directamente de la intensidad de carga del inducido:

$$\Phi = K_3 I_i$$

En este caso la velocidad vendría dada por la expresión:

$$N = \frac{V_b - \Sigma r I_i}{\Phi}$$

El término $\Sigma r I_i$ indica las caídas de tensión producidas en la resistencia del inducido y en los devanados de excitación, polos de conmutación, etc. Por lo general, este término suele ser bastante pequeño, por lo que podemos decir, con bastante aproximación que:

$$N \approx \frac{K}{\Phi}$$

En la Figura 20.11 se puede apreciar la curva característica de velocidad, que posee la forma de una hipérbola. Según aumenta la intensidad del motor, el motor va perdiendo velocidad. Para corrientes muy pequeñas el motor tiende a alcanzar velocidades muy elevadas que pueden llegar a ser peligrosas, por lo que no conviene hacer funcionar estos motores en vacío.

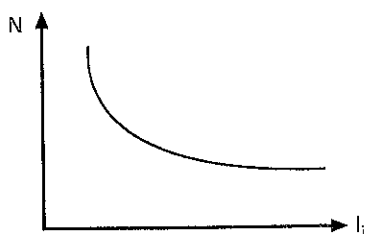


Figura 20.11. Característica de velocidad de un motor serie.

Característica del par motor. El par motor depende de la intensidad del inducido y del flujo magnético. En un motor serie tendremos entonces que:

$$C = K_2 \Phi I_i = K_2 K_3 I_i I_i = K_4 I_i^2$$

Esta ecuación representa una parábola. El par motor crece con el cuadrado de la intensidad, por lo que responde bien en trabajos de tracción.

El motor serie se caracteriza por tener un par muy elevado de arranque, ya que si la intensidad en el arranque es muy elevada, el par crecerá en forma cuadrática a esta intensidad. En la práctica, la saturación y la reacción del inducido tienden a oponerse a que el par aumente con la misma rapidez que el cuadrado de la corriente, por lo que la curva $C = f(I_i)$ no llega a ser exactamente una parábola, tal como se muestra en la Figura 20.12.



Figura 20.12. Característica de par motor de un motor serie.

Característica mecánica. En la Figura 20.13 se ha representado la curva $C = f(N)$. La velocidad del motor disminuye según se le exige un mayor par resistente. Cuando el par sobrepasa el punto (1), el motor no puede con la carga y tiende a pararse. Cuando el motor desarrolla un par por debajo del punto (2), el motor tiende a embalsarse.

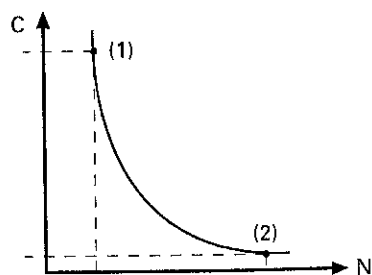


Figura 20.13. Característica mecánica de un motor serie.

Los motores serie se utilizan para los casos en que se exige un gran par de arranque, como, por ejemplo, en los tranvías, locomotoras, grúas, etc. Además tiene otra característica que les hace especialmente adecuados para la tracción. Supongamos que un vehículo eléctrico asciende por una rampa; con un motor serie, tendería a ir más despacio en la rampa, ya que al demandar más intensidad, se reduce la velocidad y se aumenta el par. Esta reducción de velocidad permite al motor desarrollar un gran par con un aumento moderado de potencia. Con un motor derivación, al ascender la rampa, se mantendría la velocidad, con lo que el motor tendría que absorber una intensidad excesiva.

Regulación de velocidad. Para regular la velocidad en los motores serie se conecta un reostato regulador de campo en derivación con el devanado de excitación. Con este dispositivo se consigue desviar parte de la corriente que atraviesa la excitación. De esta forma se consigue controlar el flujo magnético de la excitación y, con él, la velocidad (Figura 20.14).

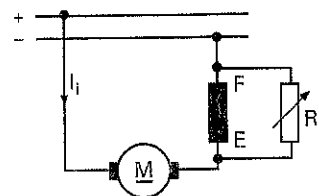


Figura 20.14. Esquema de conexiones del reostato de campo para regular la velocidad en un motor serie.

20.11.4 Motor de excitación compound

En estos motores se divide el devanado de excitación en dos partes. Una de ellas se conecta en serie con el inducido y la otra en derivación, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 20.15.

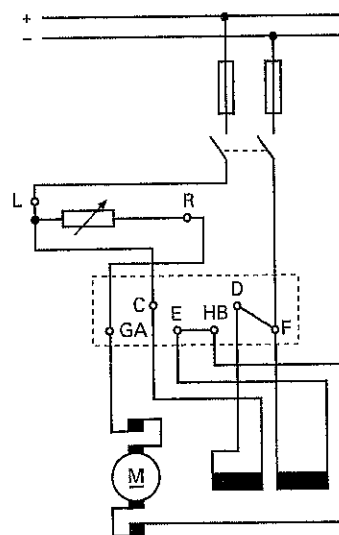


Figura 20.15. Esquema de conexiones de motor de C.C. con excitación compound.

Con el devanado en derivación se consigue evitar el peligro de embalamiento del motor por reducción de flujo, por lo que estos motores se comportan en vacío como los motores en derivación. En carga, el devanado en serie hace que el flujo aumente, por lo que la velocidad tiende a disminuir, aunque no en la misma medida que lo hace un motor serie.

En la Figura 20.16 se muestran las curvas características correspondientes a un motor compound.

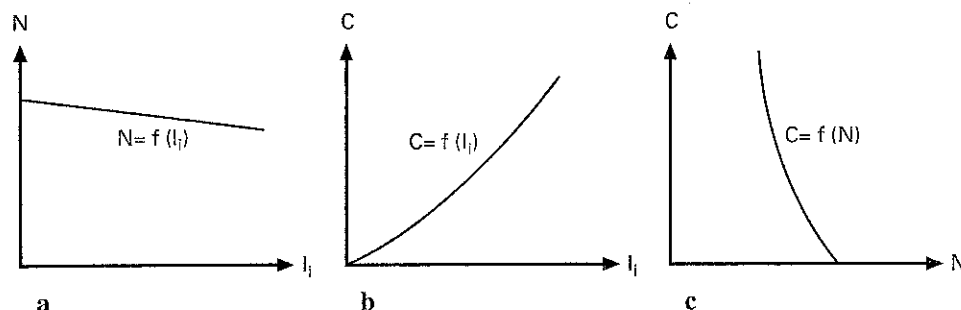


Figura 20.16. Curvas características de un motor compound: a) característica de velocidad, b) característica del par motor, c) característica mecánica.

Los motores compound se utilizan en aquellos casos en los que el par de arranque de los motores shunt no es capaz de mover la carga en los primeros momentos, como, por ejemplo, en dispositivos de elevación.

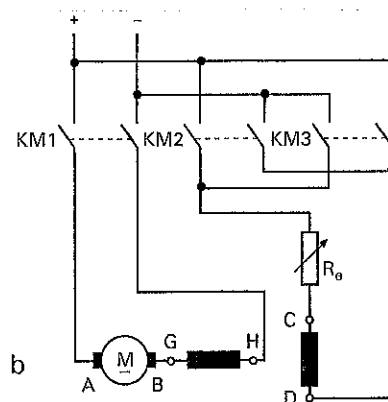
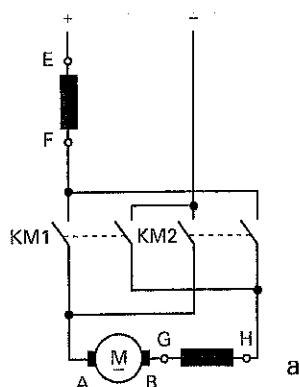
20.12 Inversión del sentido de giro

Existen muchas aplicaciones donde es necesario dotar a los motores con sistemas que sean capaces de hacerlos girar indistintamente en uno u otro sentido; como por ejemplo, en sistemas de elevación, tracción eléctrica, etc.

Existen dos formas de invertir el sentido de giro de un motor:

- Cambiando la polaridad del inducido, manteniendo fija la polaridad del devanado de excitación.
- Cambiando la polaridad del devanado de excitación, manteniendo fija la polaridad del inducido.

En la práctica se suele optar por la primera (permutar la polaridad del inducido), ya que el invertir la polaridad de la excitación ocasiona ciertos inconvenientes, debidos a la alta inductancia que posee este devanado y por el magnetismo remanente de las piezas polares.



capaces de conocer en todo momento el punto de funcionamiento del motor, de tal forma que se consigue el control y regulación de todas las variables del mismo con la máxima efectividad.

En la Figura 20.18 se muestra, a modo de ejemplo y en representación esquemática, el sistema de regulación de un motor de C.C. de excitación independiente por dinamo tacométrica.

Figura 20.17. Esquemas de conexiones para la inversión de giro de un motor de C.C. a) motor serie, b) motor derivación.

En la Figura 20.17 a se muestra el esquema de fuerza correspondiente a la inversión de giro de un motor con excitación serie. Su funcionamiento es como sigue: cuando se acciona el contactor KM1, mientras que el KM2 permanece abierto, se alimenta al inducido de tal forma que el terminal A se une con el polo positivo de la alimentación y el terminal B con el negativo. En este caso el motor gira en un determinado sentido. Para invertir el sentido de giro se desconecta el contactor

KM1 y se conecta el KM2, consiguiendo ahora que el terminal A del inducido quede conectado al negativo de la alimentación y el B al positivo. Observa que la polaridad del devanado inductor, marcado con los terminales C-D, no cambia de polaridad en ningún caso.

En la Figura 20.17 b aparece el esquema de fuerza correspondiente a la inversión de giro de un motor con excitación derivación. Aquí se ha optado por invertir la polaridad del devanado de excitación, bien accionando el contactor KM2, o el KM3, mientras que la polaridad del inducido permanece fija y alimentada constantemente por el contactor KM1.

20.13 Regulación y control de los motores de C.C.

Hasta hace muy poco tiempo, el motor de corriente continua presentaba ciertas ventajas sobre los de corriente alterna. Nos referimos a la posibilidad de variar su velocidad de forma simple. Como ya estudiaremos más adelante, para variar la velocidad de un motor de C.A. es necesario modificar la frecuencia de la tensión de alimentación, procedimiento que hasta no hace mucho tiempo presentaba serias dificultades. Hoy en día, la evolución de la electrónica permite la fabricación de variadores de velocidad para motores de C.A. a precios cada vez más competitivos, lo que unido a la mayor robustez y rendimiento, menor mantenimiento y costo de estos motores, hace que los mismos estén desplazando en su uso a los motores de C.C.

En la actualidad, gracias al avance de la electrónica, ya no se suelen utilizar los reostatos como elementos de regulación para los motores de C.C. Los modernos reguladores son

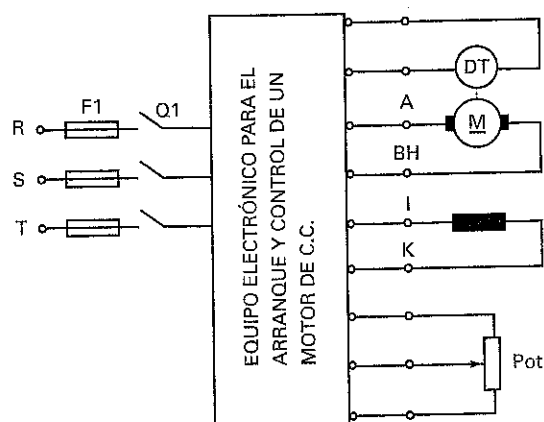


Figura 20.18. Esquema de conexiones de un equipo electrónico para el arranque y control de un motor de C.C. con excitación independiente.

El equipo se alimenta mediante corriente alterna trifásica que, a su vez, alimenta con C.C. regulada y de forma separada al devanado inductor e inducido del motor. Con el potenciómetro de referencia (Pot) se fija la velocidad de funcionamiento deseada. La tacodinamo (DT) es un pequeño generador de C.C. que genera una tensión proporcional a la velocidad con que es movida por el eje del motor. Ésta envía una tensión de retorno al equipo electrónico de control. El equipo analiza las señales de estos dos elementos y proporciona al devanado del inducido y al inductor la tensión y corriente continua necesaria para adaptarse a la velocidad de referencia prefijada.

En el arranque el equipo proporciona al motor en todo el momento del proceso y de una forma automática los valores de tensión y corrientes requeridos.

20.14 Ensayos de los motores de C.C.

De la misma forma que se hacía para las dinamos, a los motores de C.C. también se les somete a una serie de ensayos

con el fin de determinar sus características y de analizar su comportamiento en diferentes situaciones de funcionamiento. De esta forma, se pueden realizar ensayos para determinar el rendimiento, ensayos para evaluar el calentamiento de la máquina para diferentes regímenes de funcionamiento, medición de la resistencia de aislamiento, medición de la rigidez dieléctrica, etc. Además a través de los ensayos se pueden determinar las características electromecánicas de los motores, las cuáles relacionan la velocidad de rotación (N), el par motor (C), y la corriente del inducido (I_a).

Aparte de los elementos utilizados para ensayar las dinamos, ahora necesitaremos dispositivos que sean capaces de medir el par motor y que además sean capaces de someter el motor a diferentes regímenes de carga. Para ello es posible utilizar frenos de polvo magnético o dinamo-freno, que acoplados al eje del motor pueden someter a éste a diferentes pares de frenado, pudiendo conocer en todo momento el par resistente aplicado.

En la Figura 20.19 se expone a modo de ejemplo el esquema de conexiones para realizar el ensayo de un motor de C.C. con excitación en derivación.

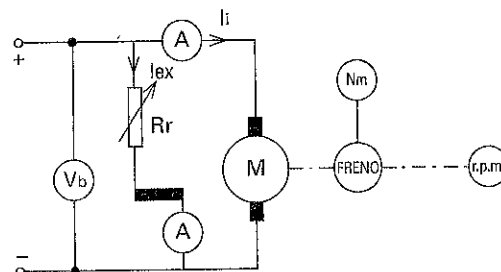


Figura 20.19. Esquema de conexiones para la obtención de las características electromecánicas de un motor de C.C. con excitación en derivación.

Actividades

1. Observa detenidamente los motores de C.C. que existen en el laboratorio de Electrotecnia. Apunta sus diferencias y clasifícalos según su excitación, poniendo especial atención en las placas de características y en las placas de bornes de los mismos.
2. Conecta un motor de C.C. (por ejemplo, un motor derivación) directamente a su tensión nominal, intercalando un amperímetro en el circuito del inducido. Comprueba cómo la corriente es muy elevada en el arranque y disminuye según se van alcanzando las revoluciones nominales. Repite la experiencia intercalando un reostato en serie con el inducido y observa cómo se consigue suavizar la corriente de arranque.
3. Conecta un motor serie para que gire en un determinado sentido. Invierte la polaridad del inducido y comprueba cómo se invierte el sentido de giro del motor.
4. Partiendo del esquema de conexiones de la Figura 20.19, realiza el ensayo de un motor con excitación en derivación para la obtención de las diferentes curvas características. Para llevar con éxito estos ensayos en el laboratorio de Electrotecnia, es importante observar previamente las características nominales de las máquinas a ensayar, como pueden ser: tipo de

excitación, tensión nominal en bornes, velocidad nominal, potencia nominal, tensión en la excitación para motores con excitación independiente, etc.

Los datos obtenidos en cada punto del ensayo se anotarán, como en otras ocasiones, en un cuadro previamente preparado donde aparecerán las magnitudes a medir.

5. Siguiendo las mismas recomendaciones que en la Actividad 20.4 obtener las curvas características de un motor con excitación en serie y de otra con excitación independiente.
6. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

Autoevaluación

- 1) La fuerza contraelectromotriz de un motor de C.C.:
 - a) ☐ Aumenta con la corriente de excitación
 - b) ☐ Disminuye al aumentar la corriente por la devanado inductor
 - c) ☐ Aumenta con la velocidad
- 2) La corriente que absorbe un motor:
 - a) ☐ Disminuye con el trabajo mecánico a realizar
 - b) ☐ Aumenta con el trabajo mecánico a realizar
 - c) ☐ Permanece constante para cualquier régimen de carga
- 3) La corriente absorbida en el arranque de un motor de C.C.:
 - a) ☐ Si no se limita su valor puede causar perturbaciones en los sistemas de alimentación
 - b) ☐ Depende exclusivamente de la resistencia del inducido
 - c) ☐ Se puede limitar mediante resistencias adicionales conectadas en serie con el devanado inductor
- 4) El par motor desarrollado por un motor de C.C.:
 - a) ☐ Disminuye con la corriente de la excitación
 - b) ☐ Se hace más elevado con la corriente del inducido
 - c) ☐ Permanece siempre constante
- 5) ¿Cómo se puede modificar la velocidad de un motor de C.C.?
 - a) ☐ La velocidad permanece siempre constante
 - b) ☐ Modificando la corriente aplicada al devanado inductor
 - c) ☐ Modificando la tensión aplicada al inducido
- 6) ¿Cómo se conectan respecto al inducido los polos de conmutación y el devanado de compensación de un motor de C.C.?
 - a) ☐ De forma independiente
 - b) ☐ En serie
 - c) ☐ En paralelo
- 7) ¿Cuál de los motores de C.C. corre peligro de embalsarse en vacío?
 - a) ☐ Excitación serie
 - b) ☐ Excitación derivación
 - c) ☐ Excitación compound

8) ¿Cuál de los motores de C.C. mantiene su velocidad relativamente constante para cualquier régimen de carga?

- a) ☐ Excitación serie
- b) ☐ Excitación derivación
- c) ☐ Excitación compound

9) Un motor de C.C. de excitación en serie se conecta a una tensión de 440 V. Determinar la corriente absorbida por el motor en el arranque si la resistencia interna del inducido es de $0,35 \Omega$, la resistencia del devanado inductor es de $0,1 \Omega$ y la caída de tensión de las escobillas es de 2 V. Determinar la corriente en el arranque del motor si se incorpora una resistencia adicional en serie con el inducido de 5Ω .

10) Un motor de C.C. de excitación independiente de 10 KW se conecta a una tensión de 110 V. Determinar la corriente absorbida por el mismo en el arranque, si la resistencia interna del inducido y de los polos de

conmutación es de $0,3 \Omega$ y la caída de tensión de las escobillas es de aproximadamente 2 V. ¿De qué valor tendrá que ser la resistencia del reostato de arranque que habrá que conectar en serie con el inducido para que la intensidad en el arranque no supere 2 veces a la nominal?

11) Determinar la potencia eléctrica y la corriente de un motor de C.C. de las siguientes características: potencia útil = 5 CV, $\eta = 89\%$, 110 V.

12) ¿Cuál será la fuerza media que aparece en la periferia del rotor de un motor si este rotor posee un diámetro de 15 cm y desarrolla un par motor de 100 Nm?

13) Determinar el par nominal de rotación de un motor de 20 CV si en régimen nominal gira a una velocidad de 7.230 r.p.m.

14) Se desea conseguir que la fuerza media que aparezca en la periferia del rotor de un motor eléctrica sea de 1.000 N a una velocidad de 1.465 r.p.m. Averiguar la potencia útil del motor si el diámetro del rotor es de 25 cm.