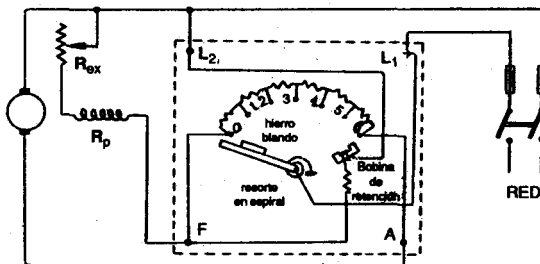


Capítulo 5

EL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA EN REGIMEN ESTABLE

- 5.1 Formas de conexión
- 5.2 Circuitos equivalentes. Ecuaciones
- 5.3 Curvas características
- 5.4 Arranque, puesta en marcha, vacío y trabajo con carga
- 5.5 Características de operación:
 - control de velocidad
 - inversión del sentido de giro
 - frenado eléctrico
- 5.6 Distribución de pérdidas
- 5.7 Eficiencia
- 5.8 Datos de placa



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA DEL PERU
BIBLIOTECA
INGENIERIA

EL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA EN REGIMEN ESTABLE

Como toda máquina eléctrica rotativa, la de continua puede funcionar tanto como generador como motor (principio de reciprocidad de Lenz). Cuando trabaja como motor es necesario que la armadura reciba alimentación de corriente desde una fuente exterior, que puede ser la misma que alimenta la bobina de excitación, como sucede con frecuencia.

En resumen, un motor de continua recibe energía eléctrica de corriente continua y entrega en el eje energía mecánica a una carga mecánica (una bomba, un ventilador, un compresor, una grúa, una faja transportadora, un vehículo de tracción, un ascensor, un molino, una mezcladora, un generador eléctrico, una laminadora, una máquina-herramienta, etc.).

En la actualidad los motores de continua están siendo sustituidos por motores de corriente alterna asíncronos alimentados por fuentes de frecuencia variable, en aquellas aplicaciones donde se requiere velocidad regulable.

En un motor, el sentido de la corriente de armadura I_a es opuesto a aquél que tiene cuando opera como generador para el mismo sentido de giro del rotor, si las polaridades de la tensión no se cambian. Lo mismo puede decirse de la corriente de línea o de carga I_q .

Si V_t es la tensión aplicada a los terminales del circuito de la armadura, entonces, se cumple que:

$$V_t = E_a + I_a \cdot r_a$$

donde E_a es la f.c.e.m. inducida.

Obsérvese que en este caso la tensión en bornes es mayor que la f.e.m. inducida:

$$V_t > E_a$$

Es importante, para la explicación de ciertos problemas que se presentan durante el funcionamiento, que se tome en cuenta que la tensión en bornes de las escobillas es igual a:

$$E_a \pm E_{rem} = K \cdot I_{ex} \cdot \omega \pm k_a \cdot \phi_{rem} \cdot \omega$$

En los cálculos prácticos se ignora E_{rem} .

En el subcapítulo 4.2 se vio una expresión para el torque electromagnético o torque mecánico interno T_{mi} :

$$T_{mi} = K \cdot I_{cx} \cdot I_a$$

Como la expresión de la f.e.m. inducida E_a es semejante a la del torque:

$$E_a = K \cdot I_{cx} \cdot \omega$$

dividiendo ambas expresiones, se obtiene una expresión muy significativa, sabiendo que la corriente de excitación es la misma en ambas expresiones:

$$\frac{T_{mi}}{E_a} = \frac{I_a}{\omega}$$

De aquí se deduce que la potencia electromagnética o potencia mecánica interna P_{mi} se puede expresar en términos de variables eléctricas o de variables mecánicas:

$$P_{mi} = E_a \cdot I_a = T_{mi} \cdot \omega$$

Esta expresión muestra la íntima relación que existe en el interior de una máquina eléctrica rotativa entre las potencias eléctrica y mecánica.

Los motores de continua se regulan automáticamente tomando más o menos corriente de la red según aumente o disminuya la carga mecánica, tal como se muestra a continuación.

Cuando la carga mecánica (y por lo tanto el torque) de un motor de CC aumenta desde T_1 hasta T_2 , la velocidad del motor ω disminuirá ligeramente (debido a la tendencia de un motor a frenarse cuando se le aumenta la carga) y, por lo tanto, disminuirá E_a (recuérdese que $E_a = K \cdot I_{cx} \cdot \omega$).

Esto traerá consigo un incremento de la corriente de armadura I_a ya que:

$$I_a = \frac{V_t - E_a}{r_a}$$

Al aumentar I_a , se incrementará el torque motor (recuérdese que $T_{mi} = K \cdot I_{cx} \cdot I_a$) hasta hacerse igual al nuevo torque resistente de la carga T_2 y la velocidad del conjunto aumentará hasta un valor ligeramente inferior que el inicial sin que el motor se detenga.

Al disminuir la carga mecánica, el torque motor será momentáneamente superior al torque resistente de la carga y el motor se acelerará, aumentando E_a ($K \cdot I_{cx} \cdot \omega$); disminuirán, entonces, I_a y T_{mi} hasta hacerse igual al nuevo torque resistente, deteniéndose nuevamente el equilibrio a una velocidad ligeramente superior a la inicial.

5.1 FORMAS DE CONEXION

Lo mismo que los generadores, los motores de CC se clasifican por el método de conexión del arrollamiento de excitación con relación al inducido.

En correspondencia con esto, existen motores de excitación en:

- derivación (paralelo o shunt),
- serie, y
- compuesta (mixta o compound).

El esquema de principio de cada una de estas formas de conexión se muestra en la figura 5.1.

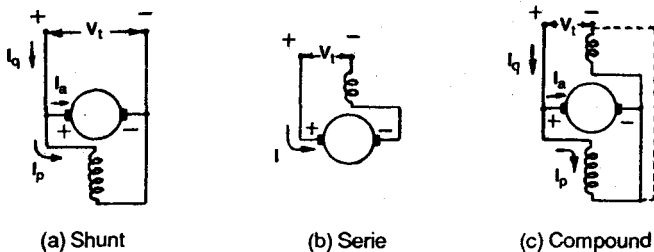


Fig. 5.1 Formas de conexión de los motores de corriente continua.

Todos estos tipos de motores se emplearon ampliamente y en correspondencia con las diversas exigencias planteadas a ellos por los distintos tipos de accionamientos, tienen características bastante diferentes.

Sin embargo, el funcionamiento de todos los tipos de motores se basa en un mismo proceso energético caracterizado por las ecuaciones de la f.e.m. y los torques.

Antes de comenzar el estudio de estos motores es conveniente conocer algo acerca del funcionamiento en vacío y del arranque de un motor.

Un motor funciona en vacío cuando no se acopla ninguna carga al eje del mismo. Si no existe carga acoplada al eje, el motor no tiene porqué suministrar torque útil alguno.

El arranque de un motor se produce en el preciso momento en que el motor es conectado a la red eléctrica y su velocidad todavía es cero, mejor dicho, el motor está aún en reposo y empieza a ponerse en marcha.

5.2 CIRCUITOS EQUIVALENTES. ECUACIONES

Para los elementos de los circuitos equivalentes de los motores de continua se cumplen las mismas condiciones que para los generadores; los nombres y las designaciones son exactamente los mismos.

Las diferencias se presentan únicamente en el sentido de ciertas corrientes, tal como se explicara al principio.

5.2.1 Motor shunt

El circuito del motor shunt es el mismo que el de un generador shunt mostrado en la figura 4.7. Sin embargo, en el motor, la línea alimenta tanto a la armadura como al campo, de tal forma que los sentidos de la corriente de línea I_q y la corriente de armadura I_a son inversos de los indicados. Véase la figura 5.2.

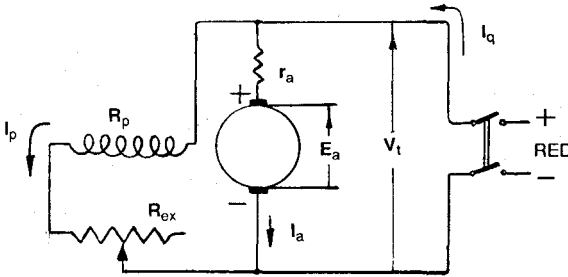


Fig. 5.2 Circuito equivalente de un motor shunt.

La corriente de línea es, por lo tanto:

$$I_q = I_a + I_p$$

En el circuito de la bobina de campo se cumple que la corriente de excitación es igual a:

$$I_p = \frac{V_t}{R_p + R_{ex}}$$

En el motor shunt, la corriente de excitación I_p no es afectada por la carga, con tal que la tensión aplicada al motor V_t permanezca constante. Por lo tanto, en la región lineal de magnetización, el flujo inductor es constante y el torque mecánico interno T_{mi} es proporcional a la corriente de armadura I_a :

$$T_{mi} = K \cdot I_p \cdot I_a = C \cdot I_a$$

donde C es la constante de proporcionalidad.

Un problema común consiste en calcular la velocidad en régimen perma-

nente, el torque y la potencia motores cuando se tiene como dato la curva de magnetización o de vacío (esta curva puede ser la misma que se obtiene haciendo funcionar la máquina como generador).

La curva de magnetización está dada para una velocidad determinada, normalmente la nominal o cercana a ella. Sin embargo, se sabe que esta información puede ser útil para cualquier otra velocidad, tal como se vio en el acápite 4.2.1.

Cuando se suministra potencia eléctrica P_{el} a un motor de CC la potencia entregada al mismo es igual al producto de la tensión en bornes V_t por la corriente de línea I_q consumida por el motor:

$$P_{el} = V_t \cdot I_q$$

En la figura 5.3 se muestra un diagrama de flujo de potencias en un motor shunt.

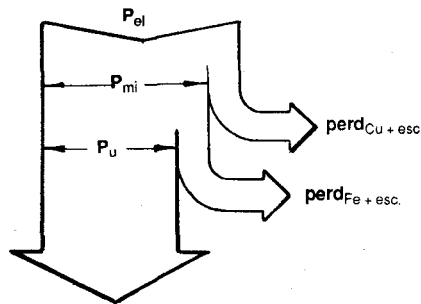


Fig. 5.3 Distribución de las potencias en un motor shunt.

Una parte de esta potencia se pierde en forma de calor en las resistencias de las bobinas de armadura r_a y de campo R_p y en el réostato de excitación R_{cx} :

$$I_a^2 \cdot r_a + I_p^2 (R_p + R_{cx})$$

En las escobillas se estaría perdiendo una potencial igual a:

$$\Delta V_{esc} \cdot I_a$$

La potencia que queda es la que se conoce como potencia mecánica interna P_{mi} y que, como se sabe, es igual a:

$$P_{mi} = E_a \cdot I_a = T_{mi} \cdot \omega$$

Téngase en cuenta que, en vacío, debido a la ausencia de carga, la corriente de línea consumida por el motor es la más pequeña posible. Esta corriente se denomina corriente de vacío I_o y se puede determinar cuando se conoce el torque de pérdidas T_{perd} (supuesto constante) a partir de la siguiente expresión:

$$I_o = I_a + I_p$$

$$I_o = \frac{T_{perd}}{K \cdot I_p} + I_p$$

Cuando no se conoce K su determinación se hace a partir de los datos del motor funcionando con alguna carga, normalmente la nominal. Estos datos son la tensión en bornes V_t , la corriente consumida I_q , las resistencias de las bobinas, r_a y R_p y la de excitación R_{ex} , así como la velocidad de giro ω .

Con toda esta información, se determina la f.c.e.m. inducida E_a y, a partir de ella, el valor de K según la siguiente expresión:

$$K = \frac{E_a}{I_p \cdot \omega}$$

El motor shunt se aplica en el accionamiento de cargas que requieren una velocidad casi constante, pero que no requieren un alto torque de arranque, tales como sopladores, bombas centrífugas, ventiladores, máquinas herramientas, etc.

5.2.2 Motor serie

En la figura 5.5 puede verse el diagrama circuital equivalente de un motor de CC conexión serie.

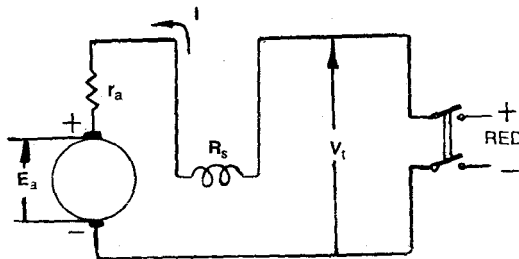


Fig. 5.5 Circuito equivalente del motor serie.

Debido a que el motor serie tiene su campo en serie con la armadura, la corriente de armadura I_a proporciona la excitación del campo. En consecuencia, a medida que la corriente de armadura aumenta, el flujo también aumenta. En la región lineal de magnetización, el flujo es proporcional a la corriente de armadura; el torque mecánico interno T_{mi} es, entonces, proporcional al cuadrado de la corriente. Sin embargo, cuando el hierro está saturado, sólo se tiene un aumento gradual en el flujo con una corriente que aumenta, y el torque aumenta en una proporción menor que el cuadrado de la corriente:

$$T_{mi} = K \cdot I_{ex} \cdot I_a$$

$$T_{mi} = K \cdot I^2$$

considerando que $I_{ex} = I_a = I$.

Es de gran interés hablar del comportamiento del motor serie cuando trabaja en vacío. En vacío, la corriente consumida es bajísima, pero peligrosa porque es inversamente proporcional a la velocidad del motor.

Se demuestra, más adelante, que estos motores, en vacío, se embalan adquiriendo velocidades peligrosas para el diseño mecánico de los componentes por efecto de la elevada fuerza centrífuga.

Por esta razón se recomienda que los motores serie tengan acoplada, siempre, una carga mínima de seguridad en el eje.

En cambio, con carga, disminuyen fuertemente su velocidad.

Debido a que el campo del motor serie está en serie con la armadura, la f.c.e.m. inducida debe ser:

$$E_a = V_t - (r_a + R_s) I$$

El funcionamiento del motor serie se analiza en base a la curva de magnetización, la resistencia de armadura y la del campo serie, así como de la f.m.m. desmagnetizante de la reacción de armadura que en este trabajo se deja de lado por simplificar el estudio de estos motores.

El motor serie se aplica en el accionamiento de aquellas cargas que requieren muy altos torques de arranque y donde la variación de velocidad no es objetable y donde el motor, bajo un operación normal, siempre impulsa una carga apreciable: tranvías eléctricos, teclés, grúas, arranque de vehículos automotores y de grupos electrógenos, etc.

5.2.3 Motor compound

El motor compound, igual que el generador compound, tiene un emboinado serie y uno shunt montados en los polos del campo principal.

En la figura 5.6 se ha representado el diagrama circuital equivalente del motor compound.

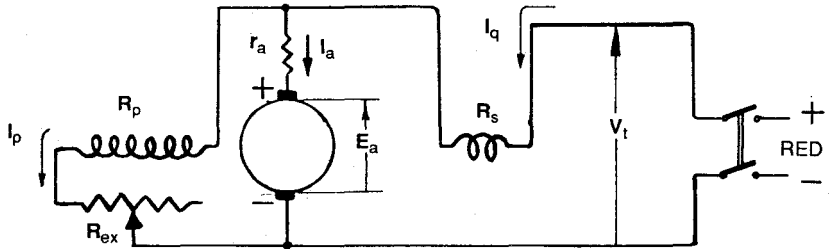


Fig. 5.6 Circuito equivalente de un motor de CC conexión compound.

Se trabajará con la conexión corta. Entonces, se cumplen las siguientes relaciones:

$$I_q = I_a + I_p$$

$$V_t = E_a + I_a \cdot r_a + I_q \cdot R_s$$

$$V_t = V_t' + I_q \cdot R_s$$

$$I_p = \frac{V_t'}{R_p + R_s}$$

Por su parte la f.c.e.m. inducida E_a depende de la corriente de excitación equivalente I_{eq} :

$$E_a = K \cdot I_{eq} \cdot \omega$$

donde I_{eq} es igual a:

$$I_{eq} = I_p \pm \frac{N_s}{N_p} I_s$$

El trabajo con I_{eq} para la solución de problemas es idéntico al que se realizó con el generador compound.

En la práctica, para la solución de problemas, se prescinde del valor de E_{rem} o de Φ_{rem} .

Las características del motor compound acumulativo (cuando las f.m.m.s de los campos serie y shunt se suman) son intermedias entre las del shunt y el serie. No tiene el inconveniente del embalamiento en vacío y su torque de

arranque es bastante elevado. Se le emplea mucho en lugar del motor serie para mover cargas pesadas.

En la figura 5.7 puede verse las curvas de torque mecánico interno T_{mi} en función de la corriente de armadura I_a para las tres formas de conexión de los motores de CC.

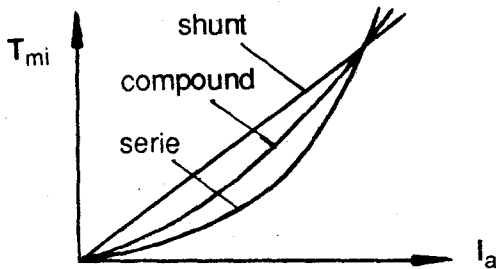


Fig. 5.7 Curvas de torque mecánico en función de la corriente de armadura.

En el motor shunt, la corriente de campo I_p no se afecta por la carga, con tal que la tensión en bornes V_t , aplicada al motor, sea constante.

El cálculo de la velocidad, potencia y torque del motor, en régimen estable, es un asunto sencillo cuando se tiene su curva de magnetización y otros datos.

La curva de magnetización está dada para una velocidad particular, usualmente la nominal, y puede usarse para cualquier f.c.e.m. del motor, para una excitación del campo dada, a cualquier otra velocidad, del mismo modo que se hacía en un generador.

5.3 CURVAS CARACTERISTICAS

Ciertas cualidades de los motores de CC se determinan por sus características de funcionamiento y mecánicas.

Por **características de funcionamiento** se entienden las relaciones velocidad ω y torque útil T_u en función de la corriente de línea I_a siendo constante la tensión en bornes V_t y las resistencias fijas (no regulables) en el circuito del inducido y de excitación.

Para el accionamiento eléctrico de los mecanismos industriales, tienen gran importancia las **características mecánicas**, que representan la relación del torque útil T_u con la velocidad de giro del rotor ω .

Existen otras características de mucha importancia para el estudio del motor de CC y que se tratarán más adelante.

5.3.1 Motor shunt

El esquema del motor shunt se da en la figura 5.8. Aquí, **F** son los fusibles. La tensión de la red V_t se aplica directamente a los terminales del motor. Se considera que $V_t = V_t(\text{nom})$.

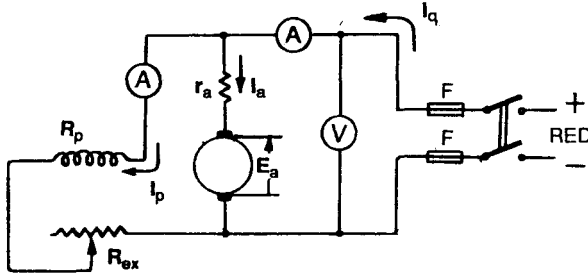


Fig. 5.8 Esquema de conexiones de un motor shunt.

El reóstato de excitación R_{ex} debe estar regulado de tal forma, que el motor desarrolle la potencia nominal $P_u(\text{nom})$ para los valores nominales de la tensión $V_t(\text{nom})$, la corriente $I_q(\text{nom})$ y la velocidad $\omega(\text{nom})$. En esta posición, sin variación, debe permanecer todo el tiempo el reóstato R_{ex} , de modo que I_p sea constante.

Estrictamente hablando, en un motor de CC también está presente el flujo remanente, de tal forma, que la f.c.em. E_a y el torque mecánico interno T_{mi} tienen las siguientes expresiones:

$$E_a = k_a \cdot \phi_{\max} \cdot \omega = K \cdot I_p \cdot \omega \pm k_a \cdot \phi_{\text{rem}} \cdot \omega$$

y:

$$T_{mi} = k_a \cdot \phi_{\max} \cdot I_a = K \cdot I_p \cdot I_a \pm k_a \cdot \phi_{\text{rem}} \cdot I_a$$

Para el motor shunt, son ciertas las siguientes igualdades:

$$I_q = I_p + I_a$$

$$V_t = E_a + I_a \cdot r_a$$

El trazado de la curva característica $T_u - I_q$ requiere despejar el T_{mi} y reemplazar expresiones que contengan a I_q ; por el momento, por simplicidad, se supondrá que el T_{mi} depende sólo de la corriente de excitación I_p .

El torque mecánico interno T_{mi} es la suma del torque útil T_u más el torque de pérdidas T_{perd} :

$$T_{mi} = T_u + T_{\text{perd}}$$

El torque de pérdidas se asumirá constante a pesar de las variaciones de carga, dado que éste es un motor de velocidad casi constante, tal como se verá más adelante.

Despejando el torque útil T_u y reemplazando expresiones:

$$T_u = T_{mi} - T_{perd}$$

$$T_u = K \cdot I_p \cdot I_a - T_{perd}$$

$$T_u = K \cdot I_p \cdot (I_q - I_p) - T_{perd}$$

$$T_u = -K \cdot I_p^2 - T_{perd} + K \cdot I_p \cdot I_q$$

$$T_u = Cte + K \cdot I_p \cdot I_q$$

La gráfica aproximada de $T_u - I_q$ se puede ver en la figura 5.9, en línea de trazos. La gráfica real se muestra con línea continua.

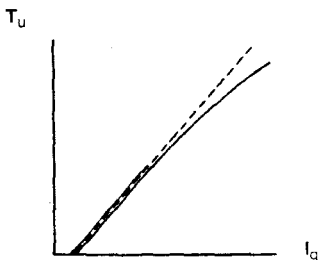


Fig. 5.9 Curvatura del torque útil en función de la corriente consumida.

En la gráfica de $T_u - I_q$ se puede ver que, aún cuando el torque útil es nulo (vacío), existe una pequeña corriente I_q que el motor consume por efecto, sobretodo, de las pérdidas mecánicas y en el hierro.

Para saber cómo depende el torque útil T_u de la velocidad ω , se procede de la siguiente manera:

Se parte de la expresión de la tensión en bornes V_t :

$$V_t = E_a + I_a \cdot r_a$$

$$V_t = K \cdot I_p \cdot \omega + I_a \cdot r_a$$

Se despeja I_a :

$$I_a = (V_t - K \cdot I_p \cdot \omega) / r_a$$

Y se reemplaza en la expresión del torque:

$$T_u = K \cdot I_p \cdot I_a - T_{\text{perd}}$$

$$T_u = K \cdot I_p (V_t - K \cdot I_p \cdot \omega) / r_a - T_{\text{perd}}$$

$$T_u = K \cdot I_p \cdot V_t / r_a - T_{\text{perd}} - (K \cdot I_p)^2 \omega / r_a$$

Esta es la ecuación de una recta con una pendiente negativa bastante grande, por ser r_a muy pequeña. Véase la figura 5.10.

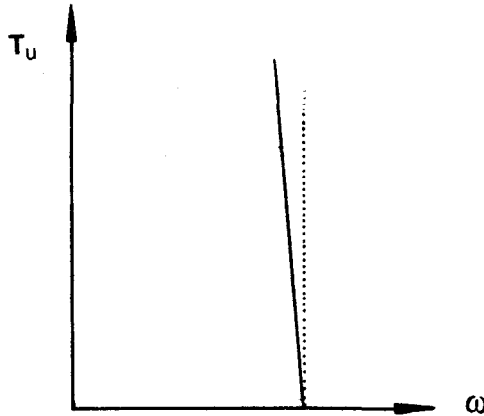


Fig. 5.10 Característica aproximada de $T - \omega$ para un motor shunt.

Para poner la corriente de línea I_q en función de la velocidad ω se igualan las dos expresiones del torque ya obtenidas y se despeja I_q :

$$T_u = -K \cdot I_p^2 \omega - T_{\text{perd}} + K \cdot I_p \cdot I_q$$

$$T_u = K \cdot I_p \cdot V_t / r_a - T_{\text{perd}} - (K \cdot I_p)^2 \omega / r_a$$

$$I_q = V_t / r_a - I_p - K \cdot I_p \cdot \omega / r_a$$

Una gráfica aproximada de esta última expresión se puede ver en la figura 5.11.

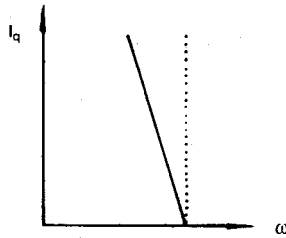


Fig. 5.11 Curva característica de $I_q - \omega$ para un motor shunt.

5.3.2 Motor serie

En la figura 5.12 puede verse el esquema de conexiones del motor serie.

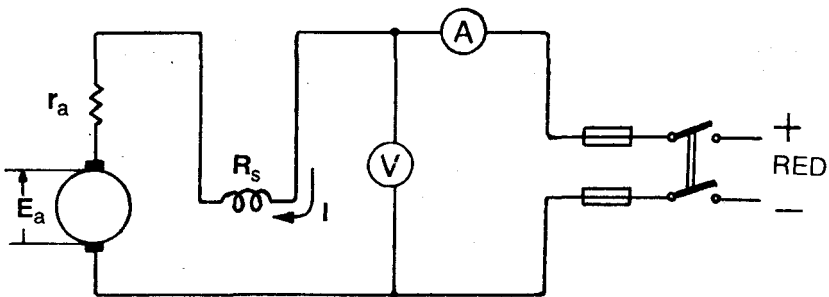


Fig. 5.12 Conexión del motor serie.

Del mismo modo que para el motor shunt, se parte de la expresión del T_{mi} :

$$T_{mi} = K \cdot I_{ex} \cdot I_a = K \cdot I^2 = K \cdot I_q^2$$

$$T_u = T_{mi} - T_{perd}$$

$$T_u = K \cdot I_q^2 - T_{perd}$$

El torque de pérdidas varía con la velocidad pero siempre es un valor pequeño comparado con el torque nominal por lo que se le considerará como de valor constante por simplicidad, en cuyo caso, la representación de la curva $T_u - I_q$ tendrá la forma que se ve en la figura 5.13.



Fig. 5.13 El torque útil en función de la velocidad para un motor serie.

La curva de torque útil en función de la velocidad ω se encuentra con el siguiente procedimiento:

$$V_t = E_a + I_a (r_a + R_s)$$

$$V_t = K \cdot I_p \cdot \omega + I_a (r_a + R_s)$$

$$V_t = (K \cdot \omega + r_a + R_s) I_q$$

Se despeja la corriente I_q :

$$I_q = \frac{V_t}{K \cdot \omega + r_a + R_s}$$

Y se reemplaza en la última expresión del torque útil T_u :

$$T_u = K \cdot \frac{V_t^2}{(K \cdot \omega + r_a + R_s)^2} - T_{\text{perd}}$$

Una gráfica de esta relación se puede ver en la figura 5.14

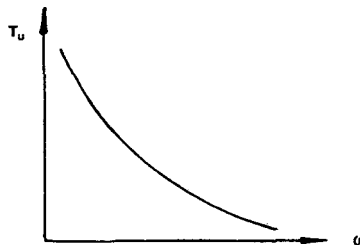


Fig. 5.14 Curva de torque útil en función de la velocidad de giro para un motor serie.

Es sencillo determinar los puntos extremos de esta gráfica; uno, cuando el motor está en vacío ($T_u = 0$) en que la velocidad es muy grande y, por lo tanto, peligrosa; y otro, cuando el motor es conectado a la red y la velocidad del motor todavía es cero ($\omega = 0$), en este caso, el torque desarrollado es muy grande.

Igualando las dos expresiones de torque útil, se obtiene de la corriente de línea I_q en función de la velocidad ω :

$$I_q = \frac{V_t}{K \cdot \omega + r_a + R_s}$$

Esta expresión dice claramente que cuando la velocidad del motor está creciendo, la corriente consumida por el mismo va disminuyendo, tal como se ve en la figura 5.15.

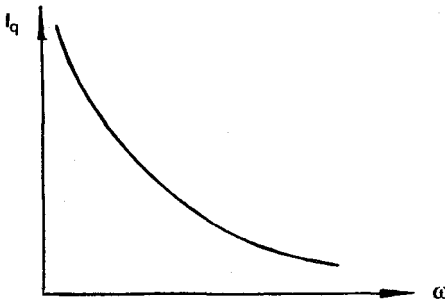


Fig. 5.15 Curvas de corriente en función de la velocidad del motor serie.

5.3.3 Motor compound

El esquema de un motor de excitación compound se da en la figura 5.16. El devanado de excitación serie puede ser conectado con relación al devanado de excitación shunt de tal forma, que sus f.m.m. se sumen (compound acumulativo) o se resten (compound sustractivo).

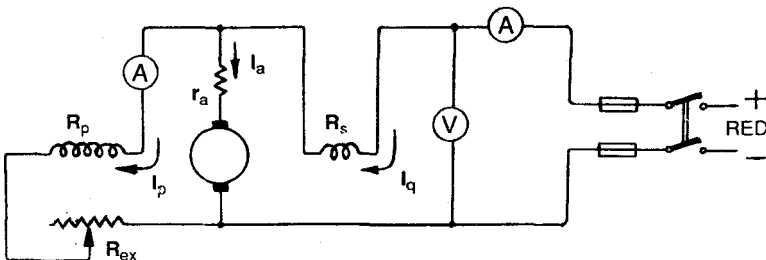


Fig. 5.16 Esquema simplificado de un motor de excitación compound.

El análisis del funcionamiento de un motor compound es similar al de los motores shunt y serie.

El motor compound acumulativo tiene características intermedias entre los motores shunt y serie.

Los motores de excitación compuesta con el campo del devando serie muy dominante se comportan en todo aproximadamente igual que los motores serie, excepto en que el campo del devanado shunt limita la velocidad de vacío a un valor de seguridad aceptable.

Los motores de excitación compuesta con poco devanado serie tienen una característica velocidad-carga francamente descendente.

Para encontrar expresiones sencillas de las curvas características, se considerará sólo la relación entre el torque mecánico interno T_{mi} , la corriente de armadura I_a y la velocidad ω .

El torque mecánico interno T_{mi} es igual a :

$$T_{mi} = K \cdot I_{cq} \cdot I_a$$

Reemplazando el valor conocido de I_{cq} , se tiene:

$$T_{mi} = K \left(I_p \pm \frac{N_s}{N_p} I_s \right) I_a$$

Cuando se trata del motor compound conexión larga, la corriente de excitación I_p es constante y la corriente de excitación I_s es igual a la corriente de armadura I_a . Por lo tanto, la expresión del torque queda como sigue:

$$T_{mi} = K \cdot I_p \cdot I_a \pm K \frac{N_s}{N_p} I_a^2$$

En la figura 5.17 se ha graficado la curva de $T_{mi} - I_a$ para los motores compound acumulativo y sustractivo.

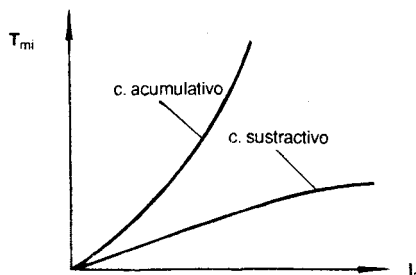


Fig. 5.17 Curvas de $T_{mi} - I_a$ para los motores compound.

La expresión del torque mecánico interno T_{mi} en función de la velocidad puede hallarse fácilmente partiendo de la ecuación de las tensiones:

$$V_t = E_a + I_a (r_a + R_s)$$

$$V_t = K \cdot I_{cq} \cdot \omega + I_a (r_a + R_s)$$

$$V_t = K \left(I_p \pm \frac{N_s}{N_p} I_a \right) \omega + I_a (r_a + R_s)$$

Despejando I_a en esta última expresión, queda:

$$I_a = \frac{V_t - K \cdot I_p \cdot \omega}{r_a + R_s \pm K \frac{N_s}{N_p} \omega}$$

Remplazando este valor de I_a en la expresión anterior del torque T_{mi} se obtiene la siguiente expresión de la característica mecánica del motor compound:

$$T_{mi} = K \cdot I_p \frac{V_t - K \cdot I_p \cdot \omega}{r_a + R_s \pm K \frac{N_s}{N_p} \omega} \pm \frac{K N_s (V_t - K \cdot I_p \cdot \omega)^2}{N_p \left(r_a + R_s \pm K \frac{N_s}{N_p} \omega \right)^2}$$

En la figura 5.18 se ha dibujado las curvas características de $T - \omega$ para los motores de corriente continua conexión compound.

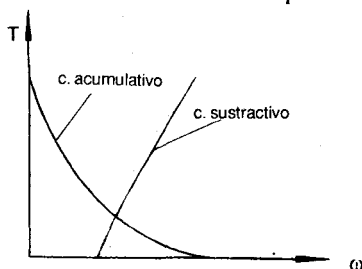


Fig. 5.18 Característica mecánica de los motores compound.

Se observa que en el motor compound sustractivo la velocidad crece bastante con la carga, lo cual lo hace impráctico para el accionamiento de cargas comunes. El problema de este motor es que tiende a embalsarse, adquiriendo velocidades peligrosas, cuando se le aumenta la carga, lo cual no ocurre con ninguno de los otros tipos de motores.

Finalmente, en la figura 5.19 se puede ver la curva de la corriente de armadura I_a en función de la velocidad ω según la expresión obtenida más arriba.

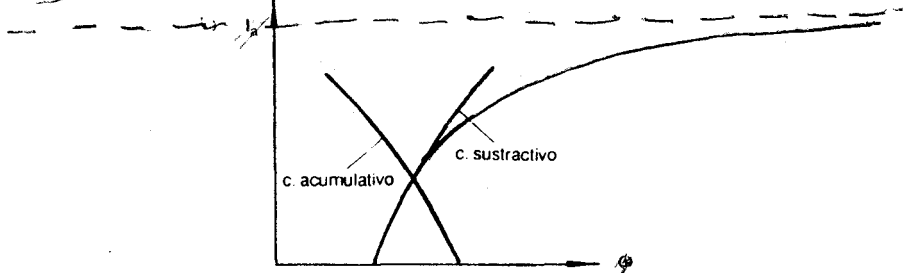


Fig. 5.19 Característica de funcionamiento $I_a - \omega$ para los motores compound.

5.4 ARRANQUE, PUESTA EN MARCHA, VACIO Y TRABAJO CON CARGA

El trabajo con motores eléctricos requiere el conocimiento de ciertos términos (relacionados con la operación y el funcionamiento) de uso frecuente no sólo en el análisis de las máquinas sino en el trabajo directo con las mismas en el taller o en la planta.

Esto obliga a definir con precisión las cantidades eléctricas y mecánicas que corresponden a los diferentes momentos de la operación de un motor.

La finalidad de un motor es suministrar en el eje un torque motor (a una velocidad angular determinada) a una carga mecánica la cual ofrecerá, en condiciones permanentes, es decir, a velocidad constante, un torque resistente igual al torque motor o motriz.

Sin embargo, antes que esto ocurra, el motor estuvo parado (quieto o en reposo), es decir, con velocidad $\omega = 0$ y con la red desconectada, o sea, el motor, sin alimentación de la red.

En el preciso momento en que se cierra el interruptor, la tensión de la red se aplica al circuito eléctrico del motor y éste empieza a moverse siendo su velocidad inicial cero ($\omega = 0$). A este momento inicial de la operación de un motor se le conoce con el nombre de **arranque**.

En el arranque, los motores de continua absorben una corriente muy alta, denominada **corriente de arranque** tal como puede verse en las figuras 5.11, 5.15 y 5.19, para $\omega = 0$.

Lo mismo puede decirse del torque de arranque. Véase las figuras 5.10, 5.14 y 5.18.

Entre el instante del arranque, $\omega = 0$, y el punto de operación, $\omega = \text{cte}$, transcurre un periodo que se denomina **período de puesta en marcha**. Durante este tiempo, el motor aumenta continuamente su velocidad con una aceleración angular $\alpha = d\omega/dt$ debida al torque acelerador T_{ac} .

El torque acelerador T_{ac} es la diferencia entre los torques motor T_{mot} y resistente T_{res} :

$$T_{ac} = T_{mot} - T_{res}$$

El torque acelerador se aplica sobre todas las masas giratorias cuyo momento de inercia referido al eje del motor es I y las acelera con una aceleración α , de tal modo, que:

$$T_{ac} = I \cdot \alpha$$

Así como los motores presentan curvas mecánicas características de $T - \omega$, las diferentes cargas también presentan sus propias características mecánicas que dependen de las particularidades de cada una de éstas. En la figura 5.20 puede verse algunas curvas de cargas mecánicas típicas.

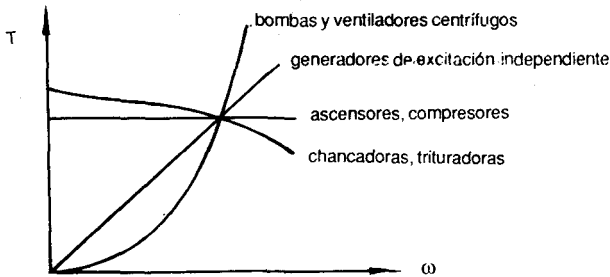


Fig. 5.20 Características mecánicas de cargas típicas.

En la figura 5.21 se ha trazado las curvas de características mecánicas de un motor y una carga cualquiera con el fin de aclarar los conceptos relacionados con los torques.

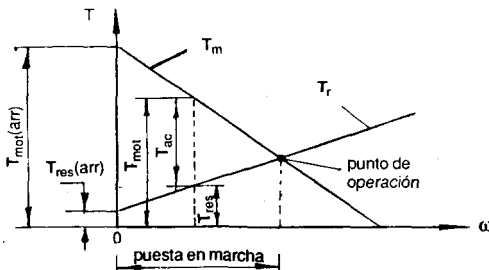


Fig. 5.21 Curvas de funcionamiento de un motor eléctrico acoplado a su carga.

Para que un motor pueda accionar una carga es necesario que el torque motor T_{mot} sea mayor que el torque resistente T_{res} . En caso contrario, el motor se queda parado consumiendo la elevada corriente de arranque que terminará quemándolo.

En el punto en que se cruzan las curvas del motor y de la carga, el torque acelerador se anula y, por lo tanto, la aceleración angular; entonces, la velocidad se hace constante y se dice que el motor alcanza su **punto de operación**, esto es, una posición de equilibrio.

No existe una sola curva para el motor ni para la carga. En uno y otro es posible trasladarse a otras curvas introduciendo variaciones o cambios en los valores o posiciones de sus componentes. Así, en el motor se puede cambiar el valor de la resistencia del réostato de campo mientras que, en una bomba, por ejemplo, se puede cambiar la apertura de la válvula de descarga.

Si se mantiene invariables los parámetros del circuito del motor, la curva de características mecánicas no cambiará.

Con el fin de explicar el trabajo de un motor con carga, en vacío y con sobrecarga es necesario introducir variaciones en la carga y por lo tanto en sus curvas.

Supóngase que se trata de una bomba centrífuga, que, con una cierta apertura de la válvula de descarga, ha sido puesta en marcha. El conjunto motor-bomba se encuentra girando a una velocidad constante.

Si, de pronto, se quiere alcanzar el punto de operación nominal porque la carga es mediana y el motor no está desarrollando todavía su potencia de placa, entonces, se abre la válvula de descarga de la bomba hasta que se alcance el punto nominal **N** de operación. Esto equivale a haberse trasladado a una curva superior, tal como puede verse en la figura 5.22.

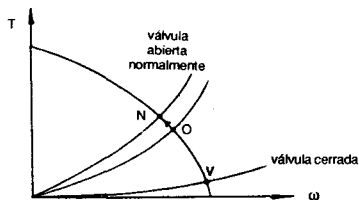


Fig. 5.22 Trabajo con distintas cargas de un motor eléctrico.

Para reducir la carga del motor basta con ir cerrando la válvula; entonces, se producirá un traslado de las curvas desde el punto **N** hacia el punto **V**, que corresponde a la válvula completamente cerrada y, por lo tanto, a una carga nula o trabajo en vacío para el motor con un torque útil mínimo muy bajo, el que corresponde a las fricciones mecánica y viscosa de la bomba.

Si la apertura de la válvula corresponde a una curva por encima de la que pasa por N , se dice que el motor está sobrecargado. En estas condiciones, el motor no debe trabajar por mucho tiempo porque las corrientes consumidas son mayores que la máxima permitida. En todo caso, sólo está permitido el trabajo con sobrecargas por tiempos breves.

5.4.1 Corriente y par de arranque

Para la mayoría de los motores de continua se cumple la siguiente ecuación, en mayor o menor grado:

$$V_t = E_a + I_a \cdot r_a$$

$$V_t = K \cdot I_{ex} \cdot \omega + I_a \cdot r_a$$

Como se sabe, en el momento del arranque, la f.e.m. es nula pues no hay movimiento todavía; por consiguiente, la corriente de armadura absorbida por el motor será igual a:

$$I_a = \frac{V_t}{r_a}$$

Como la resistencia de armadura r_a es pequeña, la corriente de arranque resultará ser muy alta, pudiendo llegar a ser hasta diez veces mayor que la corriente nominal del motor.

Este alto valor de la corriente perjudica no sólo al motor (conmutación incorrecta), sino que también produce fluctuaciones de tensión en la red, perturbando el funcionamiento de otras cargas (otros motores conectados a la misma red bajan momentáneamente su velocidad y las lámparas reducen su intensidad luminosa, por ejemplo).

Por esta razón, todos los motores de continua, a excepción de los muy pequeños, se ponen en marcha utilizando un arrancador. El arrancador consiste en un reóstato que se denomina **reóstato de arranque** R_{arr} y que se conecta en serie con el circuito de la armadura, tal como se ve en la figura 5.23.

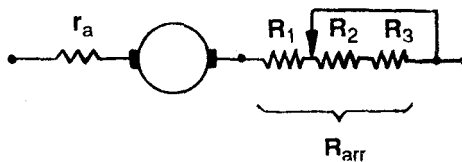


Fig. 5.23 Conexión del reóstato de arranque al circuito de la armadura.

El réostato de arranque se diseña para limitar la corriente de arranque a valores comprendidos entre 1.5 y 2.0 veces la corriente nominal del motor.

La expresión de la corriente de armadura en el arranque con réostato queda expresada de la siguiente manera:

$$I_a = \frac{V_t}{r_a + R_{arr}}$$

Conforme transcurre la puesta en marcha, las resistencias del réostato se van cortocircuitando por etapas normalmente, ya sea manual o automáticamente, hasta anular su resistencia una vez que la máquina ha adquirido velocidad suficiente.

En la figura 5.24 se ha dibujado las curvas de corriente y de torque en función de la velocidad con el fin de comprender mejor lo que ocurre durante el arranque de un motor shunt cuando se usa un réostato de arranque.

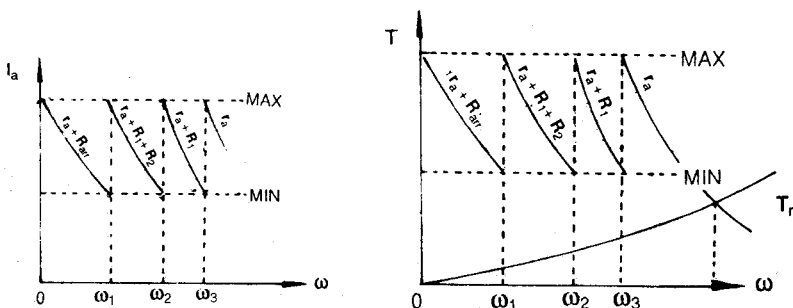


Fig. 5.24 Proceso de arranque de un motor shunt.

Las curvas de la figura 5.24 se han trazado basándose en las expresiones de la corriente y del torque en función de la velocidad ya obtenidas anteriormente y en las que se ha agregado la resistencia del réostato de arranque:

$$I_a = \frac{V_t - K \cdot I_p \cdot \omega}{r_a + R_{arr}} ; T_{mi} = K \cdot I_p \cdot \frac{V_t - K \cdot I_p \cdot \omega}{r_a + R_{arr}}$$

Se pretende que, durante el período de puesta en marcha, la intensidad en el inducido y, por tanto, el torque mecánico interno, no superen, por ejemplo, el doble de su valor nominal, y que se vayan eliminando las sucesivas resistencias del réostato cada vez que la corriente en el inducido baja hasta su valor nominal.

Es posible diseñar un arrancador de modo que cumpla los requisitos exigidos en el párrafo anterior. El diseño consiste en determinar el número de resistencias en serie y sus valores respectivos. Se puede incluso predecir la velocidad a la cual se debe cortocircuitar cada resistencia del arrancador.

Si el motor se pusiera en marcha sin ir reduciendo el valor de la resistencia del reóstato de arranque, el motor se quedaría girando con la carga a una velocidad reducida, mucho menor que la nominal.

En la figura 5.25 se ha representado un motor shunt con un arrancador de resistencias en serie. Este arrancador es manual y se hace funcionar girando el cursor (brazo móvil) en sentido horario con la mano, desde la posición de máxima resistencia hasta a la de cortocircuito, tratando de vencer la fuerza del resorte antagonista.

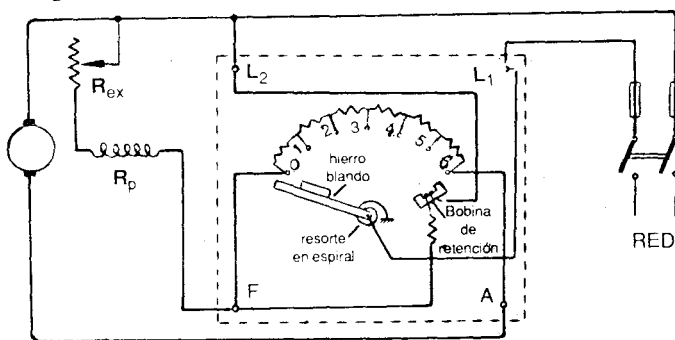


Fig. 5.25 El arrancador de tres terminales de un motor shunt.

Estos arrancadores incluyen una bobina de retención (en realidad, es un electroimán) que, por atracción magnética, mantiene el brazo móvil (viene a ser la armadura del electroimán) en la posición 6 de cortocircuito.

La bobina de retención se conecta en paralelo con el bobinado de armadura con el fin de garantizar que, cada vez que se apague el motor, el reóstato de arranque vuelva a su posición de máxima resistencia debido a la acción del resorte antagonista. De esta manera, el siguiente arranque se realizará normalmente.

Obsérvese que la f.m.m. de la bobina de retención y, por lo tanto, la fuerza de atracción electromagnética dependen directamente de la velocidad del motor. Si ésta es muy baja, la fuerza del resorte puede hacer que el reóstato vuelva a su posición inicial de máxima resistencia provocando que el motor se pare debido a la pequeña corriente de armadura.

Los motores grandes usan arrancadores automáticos. En estas instalaciones se requiere un sistema de control ya sea de la corriente de la armadura, o de la f.c.e.m. inducida que se encargue de efectuar en forma coordinada el cortocircuito de las resistencias en serie del reóstato de arranque.

5.5 CARACTERÍSTICAS DE OPERACION

Durante la operación del motor de continua se requiere muchas veces efectuar ciertos cambios que son propios del tipo de trabajo desarrollado por el equipo accionado por el motor.

A veces se requiere parar la máquina por distintas razones, debiendo, en estos casos, frenarla.

Otras veces el trabajo requiere, por ejemplo, que el equipo se mueva al revés o que regrese por la misma vía, en cuyo caso se requerirá que le sea invertido el sentido de giro al motor.

Existen aplicaciones que demandan un trabajo con velocidades distintas que son función de las características de la carga misma.

Es posible, también, que el motor sea requerido para realizar una combinación de todas estas alternativas de operación incluyendo arranques sucesivos, cuando se trata de cargas de tipo periódico con ciclos repetidos de arranques, frenados e inversiones de giro.

Los motores de continua presentan un comportamiento especial durante la operación. Las características de operación ya mencionadas se analizarán enseguida.

5.5.1 Control de velocidad

En lo que concierne a la regulación de la velocidad de rotación, los motores de continua poseen una serie de ventajas sumamente valiosas, que, en toda una serie de casos, han hecho que éstos sean insustituibles.

Aquí se tendrá principalmente en cuenta los límites de regulación de la velocidad y la economía de la operación de regulación.

La fórmula de la velocidad de un motor de continua obtenida a partir de la ecuación de las tensiones en el circuito de la armadura suministra información más que suficiente acerca de las posibilidades con que se cuenta para controlar la velocidad de estos motores:

$$\omega = \frac{V_1 - I_a \cdot r_a}{k_a \cdot \phi_{ex}}$$

De esta fórmula se desprende que la velocidad de rotación de los motores de continua se puede regular:

- variando la tensión de la red V_1 ;
- variando la caída de tensión en el circuito del inducido $I_a \cdot r_a$; y
- variando el flujo de excitación ϕ_{ex} .

El primer procedimiento es posible de realizar sólo en instalaciones especiales que permiten la regulación de la tensión V_1 .

Los dos últimos procedimientos son posibles en las instalaciones comunes de tensión constante en la red.

5.5.1.1 Regulación de la velocidad del motor variando la excitación

Este procedimiento emplea un reóstato en el circuito del devanado shunt. Es el más empleado de los tres y constituye una de las cualidades de los motores shunt aunque, naturalmente, es aplicable también a los de excitación compuesta.

En la figura 5.26 se puede ver el diagrama circuital equivalente de un motor shunt incluyendo el reóstato de campo R_{ex} para la regulación de la velocidad del motor.

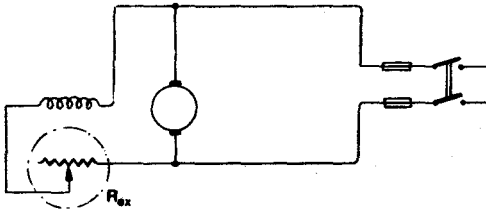


Fig. 5.26 Esquema del motor shunt con el reóstato de regulación de la velocidad.

El ajuste de la corriente de excitación y, por consiguiente, del flujo y de la velocidad, variando convenientemente la resistencia del circuito derivación, se logra con gran sencillez, economía y sin aumento sensible de las pérdidas en el motor.

La velocidad mínima conseguible es la que corresponde al campo máximo, o sea, anulando totalmente la resistencia del reóstato.

La velocidad máxima está limitada por los efectos de la reacción de armadura, que, cuando el campo es excesivamente débil, es motivo de inestabilidad y de conmutación deficiente. Adicionalmente, los campos débiles originan velocidades de giro muy altas y peligrosas para la estructura mecánica de la máquina.

Una expresión más exacta de la velocidad ω en función de la corriente de excitación I_p se obtiene considerando que el flujo total de excitación ϕ_{ex} se debe al flujo remanente ϕ_{rem} y al flujo producido por la corriente de excitación I_p , de modo que el producto $k_a \cdot \phi_{ex}$ puede ponerse en la siguiente forma:

$$k_a \cdot \phi_{ex} = k_a \cdot \phi_{rem} \pm K \cdot I_p$$

Asimismo, la corriente de armadura I_a es función del torque mecánico interno T_{mi} , el cual se puede considerar constante si el problema consiste en regular la velocidad de un motor cuya carga es de torque constante (por ejemplo, las cargas de elevación y de transporte), y del flujo de excitación ϕ_{ex} .

Con todas estas consideraciones, la velocidad de giro queda expresada del modo siguiente:

$$\omega = \frac{V_t - \frac{T_{mi} \cdot r_a}{k_a \cdot \phi_{rem} \pm K \cdot I_p}}{k_a \cdot \phi_{rem} \pm K \cdot I_p}$$

En la figura 5.27 se muestra la curva de variación de la velocidad del motor shunt con la corriente de excitación. Obsérvese cómo aumenta la velocidad del motor al disminuir la corriente de excitación, es decir, al aumentar la resistencia de campo R_{ex} .

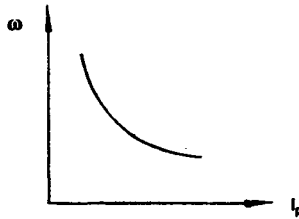


Fig. 5.27 Curva de velocidad $\omega - I_p$ para un motor shunt.

Con esta curva se comprende fácilmente porqué un motor shunt corre el riesgo de embalsarse cuando el circuito de la bobina de campo shunt se abre intempestivamente durante la marcha del motor con carga o sin ella.

Esta falla es posible que ocurra durante el ensayo de este motor en el laboratorio cuando las vibraciones del motor, transmitidas a la mesa, acaban aflojando los conductores de las borneras. Este problema puede evitarse si, durante el ensayo, se chequea continuamente que las borneras permanezcan conectadas a los terminales de los conductores.

5.5.1.2 Regulación de la velocidad del motor variando la resistencia del circuito del inducido

Esta forma de regulación consiste en rebajar la velocidad insertando resistencias en serie en dicho circuito.

Este procedimiento puede utilizarse indistintamente en los motores serie,

shunt o compound; en estos dos últimos, la resistencia en serie debe conectarse entre el devanado shunt y el inducido y nunca entre el motor y la línea.

La velocidad de los motores serie generalmente se regula por este método.

La expresión de la velocidad en función de la resistencia del reóstato de regulación R_{reg} será la siguiente:

$$\omega = \frac{V_t - I_a (r_a + R_{reg})}{k_a \cdot \phi_{ex}}$$

En la figura 5.28 se ha trazado la curva de $\omega - R_{reg}$ para los motores de corriente continua.

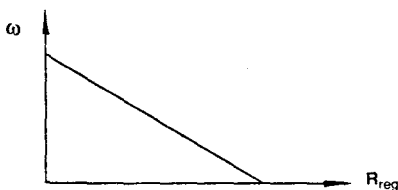


Fig. 5.28 Curva de regulación de velocidad por variación de la resistencia del inducido.

Para un valor dado de la resistencia en serie con el inducido, la velocidad varía muy ampliamente con la carga ya que depende de la caída de tensión en dicha resistencia, la que a su vez depende de la intensidad requerida por la carga.

Por ejemplo, un motor shunt de 1200 rpm cuya velocidad en carga se reduce a 750 rpm mediante resistencias en serie, recobrará su velocidad de 1200 rpm al cesar la carga, ya que el efecto de la intensidad en vacío sobre la resistencia es insignificante.

Las pérdidas de potencia en la resistencia exterior son muy crecidas, especialmente cuando se pretende una gran reducción de la velocidad; de hecho, si el par resistente es constante, la potencia de entrada en el motor y reóstato conjuntamente se mantiene uniforme, mientras que la potencia de salida en el eje decrece proporcionalmente con la velocidad, por lo que los costos de ejercicio son relativamente altos si se trabaja con poca velocidad durante períodos largos.

Sin embargo, siendo el costo inicial de instalación bastante económico, el procedimiento de las resistencias en serie encuentra aplicación cuando el tiempo en que hay que trabajar a velocidad reducida es pequeño.

5.5. 1.3 Regulación de la velocidad mediante la variación de la tensión en la red

Cuando el motor está destinado para el funcionamiento en condiciones en que varía ampliamente la velocidad, el método más conveniente de variación de su velocidad, desde el punto de vista de utilización del motor y de fiabilidad de su funcionamiento, es mediante la variación de la tensión en los bornes, siendo la excitación independiente, que permite tener la magnitud total del flujo Φ_{ex} para todas las velocidades.

En este caso, cuando la tensión en los bornes del motor se puede regular suavemente desde el valor cero hasta el máximo, es posible una amplia regulación de la velocidad del motor no sólo suave y económica, sino que también el arranque no reostático sin pérdidas en el reóstato de arranque.

El sistema más típico de este género es el sistema de Leonardo o sistema generador-motor uno de cuyos esquemas principales posibles se muestra en el figura 5.29.

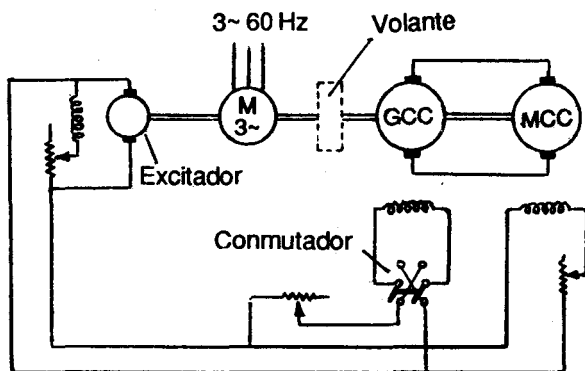


Fig. 5.29 Esquema principal del sistema generador-motor.

5.5.2 Inversión del sentido de giro

La operación de invertir el sentido de giro consiste en cambiar la marcha del motor, lo cual se puede hacer de dos maneras diferentes, tal como se deduce del capítulo 1.4 para un motor elemental. Véase la figura 1.11.

En la figura 5.30 se explica de un modo gráfico estas dos alternativas para la inversión del sentido de giro. Véase cómo cambia el sentido del vector de fuerza F que es el que tiene el sentido del movimiento, primero cuando se invierte la polaridad del campo inductor B (figura 5.30 b), segundo, cuando se invierte el sentido de la corriente por el conductor inducido (figura 5.30 c).

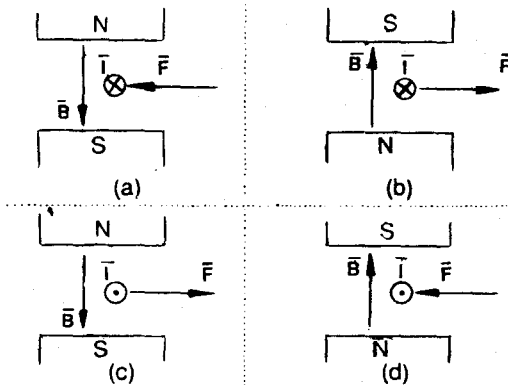


Fig. 5.30 Inversión del sentido del movimiento en un motor elemental.

Aplicando estos resultados a los motores reales se supondrá que el motor de continua, por ejemplo, el shunt, está conectado según se ve en la figura 5.31.

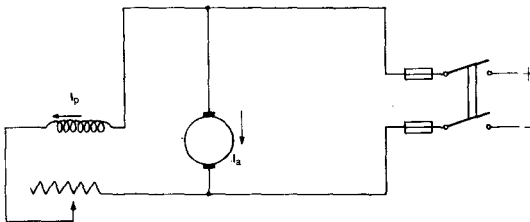


Fig. 5.31 Conexión inicial del motor shunt.

La primera forma de invertir la marcha sería, entonccs, **inviertiendo el sentido de la corriente de excitación**, tal como puede verse en la figura 5.32.

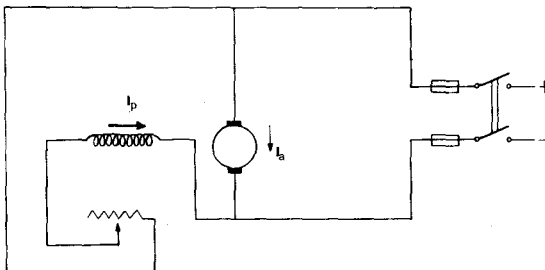


Fig. 5.32 Inversión del sentido de giro por inversión de la corriente de excitación.

La inversión de la marcha se podrá conseguir, también, invirtiendo la corriente de armadura. Véase la figura 5.33.

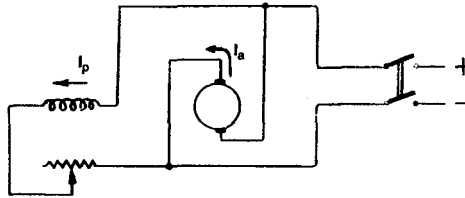


Fig. 5.33 Inversión del sentido de giro por inversión de la corriente de armadura.

Con la inversión simultánea de ambas corrientes, no se obtendría la inversión de la rotación. Véase la figura 5.30 d .

En el caso de los motores compound deberá tenerse cuidado que los campos serie y shunt permanezcan siempre aditivos, es decir, que la conexión sea siempre acumulativa.

5.5.3 Frenado eléctrico

Cuando se desea parar rápidamente un motor de continua, se puede utilizar frenos mecánicos o se puede aprovechar las mismas fuerzas magnéticas que se oponen al movimiento de un conductor en un campo magnético.

En toda una serie de instalaciones los regímenes de frenado eléctrico de los motores tienen gran importancia. El frenado puede ser:

- con recuperación de la energía en la red o regenerativo;
- por el método de conexión en oposición; y
- dinámico

5.5.3.1 Frenado regenerativo

Para un motor shunt el frenado regenerativo tiene lugar cuando la máquina, que funciona en el régimen de motor, se pone en rotación por el mecanismo accionado (caso del descenso de un ascensor aprovechando su peso) con una velocidad mayor que la velocidad de marcha en vacío $\omega (0)$.

En este caso la f.e.m. $E_a = k_a \cdot \Phi_p \cdot \omega$ se hace mayor que la tensión en la red V_t y, por lo tanto, la corriente de armadura $I_a = (V_t - E_a)/r_a$ varía de signo; correspondientemente, varía el signo del torque T_{mi} desarrollado por la máquina, es decir, la máquina comienza a funcionar en el régimen de generador en paralelo con la red.

Las partes de las características mecánicas que se refieren al régimen de fre-

nado regenerativo son la continuación de las correspondientes características del motor y están situadas en el cuarto cuadrante. Véase la figura 5.34.

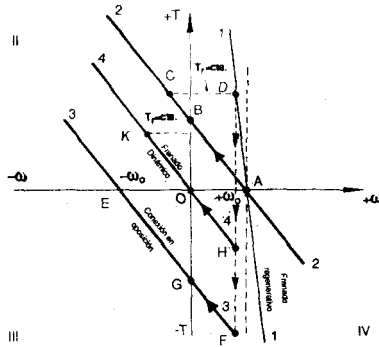


Fig. 5.34 Características mecánicas de un motor shunt en regimenes de frenado.

Para el motor serie el asunto es un poco más complicado, puesto que el motor no puede pasar, por sí mismo, del régimen de motor al régimen de frenado regenerativo aumentando simplemente la velocidad.

Al aumentar la velocidad del motor serie, disminuye el flujo de excitación Φ_{ex} , y la f.c.e.m. E_a puede aproximarse a la tensión de la red V_1 , pero no, sobrepasarla.

Por esta razón, el frenado regenerativo del motor serie se efectúa haciéndolo pasar a la excitación shunt y al funcionamiento correspondiente a esta excitación.

El frenado regenerativo de los motores serie se emplea ampliamente en el transporte eléctrico.

5.5.3.2 Frenado por el método de conexión en oposición

Otra forma de frenar eléctricamente el motor es invirtiendo su sentido de rotación. Este régimen se realiza por dos procedimientos:

- cuando la carga pone el motor en rotación en sentido contrario al de acción del torque motor

- cuando se invierte la marcha cambiando el sentido de la corriente de armadura I_a .

El primer caso tiene lugar, por ejemplo, al insertar en el circuito del inducido del motor, que eleva una carga, una resistencia R_f suficientemente grande.

Se supondrá que el torque resistente T_r es constante.

En un motor shunt, al conectar la resistencia R_f el motor pasa de la característica mecánica natural 1 (figura 5.34) a la característica mecánica 2 correspondiente a la resistencia R_f .

Si en el instante en que se conecta la resistencia R_f , la corriente I_a se limita en tal grado, que el torque motor $T_{mi} = k_a \cdot \phi_p \cdot I_a$ se hace menor que el torque resistente T_r , en el eje del motor surge un torque acelerador negativo T_{ac} y la velocidad del motor comienza a decelerarse.

En este caso, la f.e.m. E_a disminuirá, mientras que la corriente $I_a = (V_t - E_a)/(r_a + R_f)$ aumentará, correspondientemente a lo cual aumentará también el torque T_{mi} .

Este proceso de disminución de la velocidad ω paralelamente con el aumento del torque motor transcurrirá hasta que el torque motor se iguale al torque resistente T_r . En este caso, el torque acelerador se hace nulo y cesa la ulterior variación de la velocidad.

Para valores de R_f y T_r suficientemente grandes, el motor, decelerándose, puede pararse (punto B de la característica 2 en la figura 5.34), y luego comenzar a girar en el sentido contrario.

La velocidad estacionaria de bajada se determina por el punto C en el que la característica 2 se intersecta con la recta de torque resistente constante T_r .

En el régimen considerado, al motor se le suministra una potencia de la red $P_{el} = V_t \cdot I_a$ y una potencia del eje de la carga $P_{mec} = E_a \cdot I_a$; siendo la suma $P_{el} + P_{mec} = V_t \cdot I_a + E_a \cdot I_a = I_a \cdot (V_t + E_a)$, es decir, se consume totalmente en las resistencias del circuito del inducido.

Un proceso análogo tiene lugar durante el frenado de un motor serie. Al variar el sentido de rotación del rotor, la máquina puede pasar al régimen de generador con autoexcitación. Pero, con las resistencias R_f , que se insertan en el circuito del inducido para limitar la máquina prácticamente se excluye.

- El segundo caso de frenado por conexión en oposición tiene lugar cuando se desea parar rápidamente, por ejemplo, el carro de una grúa. Para esto, se cambia la polaridad de los bornes del inducido y, por consiguiente, el sentido de la corriente I_a . Véase la figura 5.35.

Se considera nuevamente constantes el torque resistente T_r y la corriente de excitación I_p .

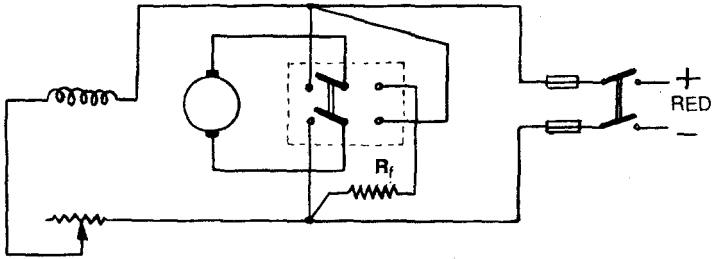


Fig. 5.35 Circuito de frenado de un motor shunt por inversión de la corriente de armadura.

En los primeros instante, después de la conmutación, el inducido continuará girando en el mismo sentido que antes de la conmutación, utilizando la energía cinética de las piezas en movimiento del accionamiento.

En estas condiciones, el signo de la f.e.m. E_a permanece invariable, mientras que el signo de la tensión V_t de la red cambia respecto de E_a , por el contrario.

Por consiguiente:

$$I_a = \frac{-V_t - E_a}{r_a + R_f} = - \frac{V_t + E_a}{r_a + R_f}$$

En estas expresiones, R_f es la resistencia adicional insertada en el circuito del inducido para limitar la corriente de armadura I_a .

La corriente I_a cambia su signo por el contrario. En el eje del motor surge un torque de frenado $-T_{mi} = k_a \cdot \phi_p \cdot (-I_a)$.

En el primer instante, después de la conmutación, el trabajo del motor se determina por el punto F (figura 5.34) que corresponde al torque $-T_{mi}$ y a la velocidad ω que tenía el motor antes de la conmutación.

Bajo la acción del torque de frenado $-T_{mi}$, el motor comenzará a deacelerarse y, correspondientemente a esto, disminuirán la f.e.m. E_a , la corriente I_a y el torque T_{mi} .

El motor, pasa al funcionamiento por la característica 3 y, para la resistencia R_f adecuadamente dada, puede pararse (punto G de la característica 3 en la figura 5.34), y luego comenzar a girar en el sentido del torque $-T_{mi}$, es decir, en sentido contrario respecto al inicial. Si esto es indeseable, el motor se desconecta de la red cuando $\omega = 0$.

Un proceso análogo tiene, también, lugar durante el frenado de un motor serie.

5.5.3.2 Frenado dinámico

Este procedimiento consiste en desconectar el motor de la red cuando está en marcha, pero, manteniendo su excitación energizada. El motor empieza a funcionar, entonces, como generador de excitación independiente sin motor primo que lo impulse, por lo que se parará rápidamente por efecto del torque resistente.

Para acelerar el frenado, se conecta la máquina a una resistencia que disipa la energía cinética de la máquina actuando como generador, en forma de calor. Véase la figura 5.36.

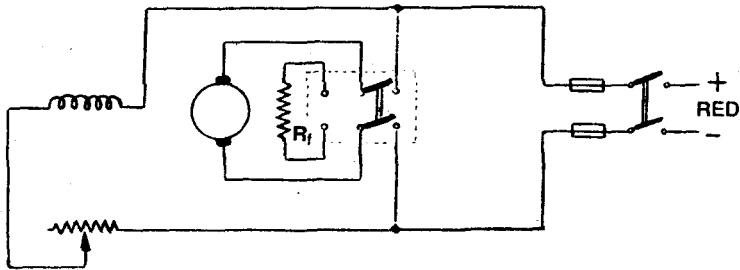


Fig. 5.36 Frenado dinámico de un motor shunt.

Puesto que en este caso, $V_t = 0$, entonces, la ecuación de la característica mecánica de la máquina tiene la forma:

$$\omega = \frac{T_{mi}}{k_a \cdot \phi_p \cdot \phi_f} (r_a + R_f) \quad \omega = \frac{T_{mi}}{k_a \cdot \phi_p \cdot \phi_f} \cdot \frac{1}{R^2 = 2}$$

Esta ecuación corresponde a una recta que pasa por el origen del sistema de coordenadas, del segundo cuadrante al cuarto.)

El proceso de frenado sucede de la manera siguiente. Supóngase que la máquina funcionaba en el régimen de característica 1 (figura 5.34). En el primer instante, después de pasar la máquina al régimen de frenado dinámico, la velocidad de rotación de la máquina prácticamente no varía y, correspondientemente, no varía la f.e.m. E_a .

Pero la corriente I_a cambia su sentido, por cuanto en el régimen de motor $I_a = (V_t - E_a)/r_a$, y en el régimen de generador $I_a = -E_a/(r_a + R_f)$.

Por consiguiente, en el eje de la máquina surge un torque de frenado $-T_{mi}$, y el trabajo de la máquina se determina por el punto H (figura 5.34) que corresponde a este torque y a la velocidad inicial ω .

En lo sucesivo, la velocidad de rotación disminuye según la característica

4, puede hacerse igual a cero y, luego, la máquina puede comenzar a girar en sentido contrario ($-\omega$) bajo la acción, por ejemplo, de la carga que descende.

La velocidad estacionaria de bajada de la carga se determina por el punto K en el que la característica 4 se intersecta con la recta del torque T_r creado por la carga, siendo $T_r = \text{constante}$.

El frenado dinámico de un motor serie puede realizarse del mismo modo que en el motor shunt, es decir, con excitación independiente. No obstante, este régimen no es económico debido al gran consumo de energía en la excitación.

5.6 DISTRIBUCION DE PERDIDAS Y POTENCIAS EN MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Las figuras 5.37 y 5.38 representan gráficamente el balance de potencia en generadores y motores de corriente continua respectivamente, ambos con excitación compuesta.

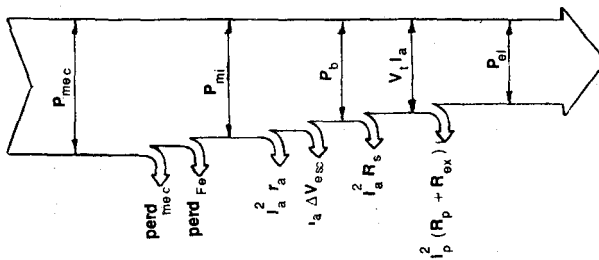


Fig. 5.37 Reparto de potencias en un generador de continua.

El diagrama de conexiones puede verse en la figura 5.39. Si la máquina carece de uno de los dos devanados, sea el serie o el shunt, deberá suprimirse de las figuras las referencias correspondientes.

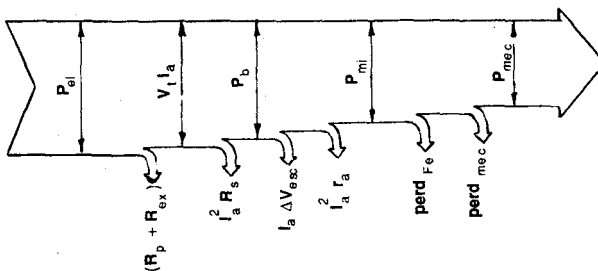


Fig. 5.28 Reparto de potencias en un motor de continua

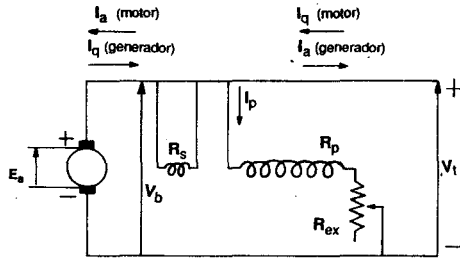


Fig. 5.39 Esquema de conexiones de un motor o de un generador de CC.

En forma simplificada, se puede resumir los siguientes tipos de pérdidas y potencias:

- P_{mec} – potencia mecánica recibida o entregada en el eje,
- P_{mi} – potencia electromagnética o potencia mecánica interna igual a $E_a \cdot I_a$,
- P_b – potencia en los bornes del inducido o potencia en el entrehierro igual a $V_b \cdot I_a$,
- P_{el} – potencia eléctrica entregada o recibida de la red igual $V_t \cdot I_q$.
- P_o – pérdidas rotacionales en vacío: incluye pérdidas mecánicas (por fricción, proporcionales a la velocidad del motor; y por ventilación, proporcionales al cubo de dicha velocidad) y pérdidas en el hierro de la armadura (por histéresis y por corrientes parásitas). (3 – 15%).
- p_a – pérdidas por efecto Joule en el arrollamiento de la armadura y en las escobillas. (3 – 6%).
- P_{ex} – pérdidas en los arrollamientos de excitación. (1 – 5%)

Los porcentajes que se dan arriba son respecto a la potencia de entrada o recibida. Los valores de dichas pérdidas corresponden a máquinas de continua de uso general y de potencia comprendida entre 1 y 100 kW. Los menores porcentajes corresponden a las máquinas de mayor potencia.

La potencia mecánica interna difiere de la mecánica en el eje en las pérdidas mecánicas (incluyendo las pérdidas en el hierro).

La misma potencia mecánica interna difiere de la potencia eléctrica en bornes de la máquina en las pérdidas en el cobre.

5.7 EFICIENCIA

La eficiencia η de una máquina de continua, en general, se define como la relación entre las potencias entregada P_{entreg} y recibida P_{recib} por la máquina:

$$\eta = \frac{P_{entreg}}{P_{recib}}$$

Si la máquina trabaja como generador, la eficiencia η_G es igual a:

$$\eta_G = \frac{V_t \cdot I_q}{V_t \cdot I_q + \text{perd}_t}$$

Si la máquina trabaja como motor, la eficiencia η_M es igual a:

$$\eta_M = \frac{V_t \cdot I_q - \text{perd}_t}{V_t \cdot I_q}$$

En las expresiones de arriba, las pérdidas totales perd_t son iguales a:

$$\text{perd}_t = I_a^2 \cdot r_a + I_p^2 \cdot (R_p + R_{cx}) + p_o$$

5.8 DATOS DE PLACA

Se llama régimen nominal de funcionamiento de una máquina eléctrica al régimen de funcionamiento en condiciones, para las cuales fue destinada por la fábrica productora.

El régimen nominal de funcionamiento se caracteriza por las magnitudes indicadas en el tablero fabril o placa de la máquina y que se denominan **nominales**:

- potencia nominal
- tensión nominal
- corriente nominal (de excitación y de carga)
- velocidad nominal de rotación, etc.

No obstante, el término "nominal" puede ser aplicado, también, a las magnitudes no indicadas en la placa de la máquina, pero que están relacionadas con el régimen nominal de funcionamiento. Por ejemplo:

- torque nominal de rotación
- rendimiento nominal, etc.

Por **potencia nominal** de una máquina de corriente continua se entiende:

- 1) al funcionar la máquina como generador, la potencia eléctrica suministrada al circuito exterior (W o kW);
- 2) al funcionar la máquina como motor, la potencia mecánica útil en el eje (W, kW, hp o cv).

Las magnitudes nominales no se deben confundir con las normales. Si, por ejemplo, la tensión nominal de un motor es 220 V, en las condiciones de funcionamiento real la tensión puede oscilar y ser mayor o menor que la nominal.

Si se toma el valor medio de la tensión en un intervalo de tiempo suficientemente largo, entonces, a este valor se le puede llamar tensión normal o de funcionamiento de la máquina.

De lo dicho se deduce que las magnitudes normales, en el caso general, pueden diferenciarse de las nominales.

Las máquinas de corriente continua se construyen en otros países en una amplia gama de magnitudes nominales. Según sus potencias, se pueden dividir en los tipos siguientes:

Micromáquinas	.....	menos de 100 W
Máquinas pequeñas	.....	de 100 W a 2 kW
Máquinas de pequeña potencia	.....	de 1 a 10 kW
Máquinas de potencia media	.....	de 10 a 100 kW
Máquinas grandes	.....	de 100 a 1000 kW
Máquinas de gran potencia	.....	más de 1000 kW

Según los niveles de tensiones nominales, generalmente, se distinguen:

Máquinas de baja tensión	.....	menos de 100 V
Máquinas de tensión media	.....	de 100 a 1000 V
Máquinas de alta tensión	.....	más de 1000 V

Según las velocidades de rotación las máquinas generalmente se dividen en:

Máquinas de bajas rpm	.....	menos de 250 rpm
Máquinas de rpm medias	.....	de 250 a 1000 rpm
Máquinas de rápidas rpm	.....	de 1000 a 3000 rpm
Máquinas ultrarrápidas	.....	más de 3000 rpm

En toda una serie de casos, cuando se exige una potencia bastante grande de la corriente continua, suele ser conveniente instalar en un mismo eje dos máquinas de corriente continua en vez de una, acoplado eléctricamente sus inductivos en serie o en paralelo.

Adicionalmente en las placas se coloca la clase de aislamiento con un código que indica la temperatura máxima con que pueden trabajar los conductores sin perjudicar el aislamiento de la máquina.

A veces, no se da la corriente de excitación como dato de placa en los motores shunt o compound. Para poderla determinar en forma aproximada se requiere medir la resistencia del bobinado de excitación shunt. La corriente no

minal de excitación se obtiene dividiendo la tensión nominal, que siempre es dato de placa, entre el valor medido de resistencia.

Aunque, en la práctica, muchas veces no es posible por la diversidad de condiciones existentes, se debería, sin embargo, en lo posible, tratar de trabajar con valores menores o iguales que las cantidades indicadas en la placa si se quiere una máquina duradera y sin problemas durante su funcionamiento.