TEMA 40

MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

40.1. REVERSIBILIDAD DE UNA DÍNAMO.

Las máquinas rotativas que funcionan con corriente continua son reversibles, es decir:

a) Cuando se aplica un par motor, se produce una fuerza electromotriz continua, por lo que se dice que la máquina funciona como un *generador.*

b) Cuando se aplica una tensión continua, la máquina produce un par motor, por lo que se dice que la máquina funciona como un *motor.*

Supongamos una dínamo cuyo esquema se representa en la Fig.40.1.

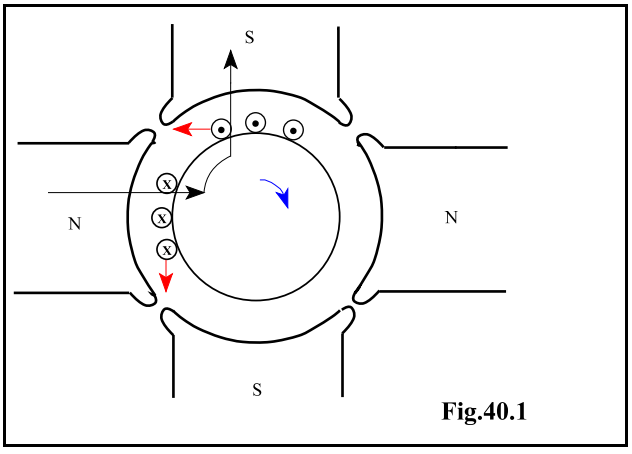


Fig.40.1

Cuando actúa como generador, se le aplica un par motor al rotor (según el sentido de giro de las agujas del reloj) y se producen unas corrientes en los conductores del inducido según se indican en la Fig.40.1. En estos conductores, al estar situados en el seno de un campo magnético, aparecerán fuerzas de origen electromagnético[1], que se opondrán al sentido de giro.

El conjunto de las fuerzas tangenciales sobre los conductores produce un par resistente que se opone al par motor, por lo que se tendrá que gastar una potencia para mover el inducido.

Ahora bien, la máquina anterior se puede describir funcionando como motor. En este caso la tensión continua que alimenta el devanado inducido hace que circule por él una corriente

[1] El sentido de las corrientes en las espiras del inducido se obtiene aplicando la regla de la mano izquierda

continua, por tanto, como los conductores se encuentran en el seno de un campo magnético, aparecerán sobre ellos fuerzas de origen electromagnéticas, y por tanto darán lugar a un par motor que hará girar el rotor. Como resultado de este giro, se inducirá en el devanado del inducido una fuerza electromotriz que se opondrá, de acuerdo con la Ley de Lenz, a la tensión aplicada, y en consecuencia será una fuerza contraelectromotriz. En la Fig.40.1, si la corriente cuando actúa la máquina como motor, fuese la misma que cuando actúa como generador, el rotor o inducido giraría en sentido contrario a las agujas del reloj, es decir, en sentido contrario a como lo hacía cuando actuaba como generador.

Como se acaba de ver, se trata de una máquina reversible.

El motor de corriente continua tiene la misma constitución que la dínamo:

a) Sistema inductor formado por **2p** polos magnéticos.
b) Devanado del inducido constituido por **2c** derivaciones.
c) Conductores activos, **n** en total, que constituyen el inducido.
d) Colector de delgas.
e) Contacto del circuito exterior por escobillas, sobre el anillo colector.

De acuerdo con el sistema que se utilice para la excitación, se pueden clasificar los motores en los siguientes grupos:

1.- Inducido e inductor en serie: *motor serie.*
2.- Inducido e inductor en derivación: *motor derivación* o *shunt.*
3.- Inducido e inductor, parte en serie y parte en derivación: *motor compuesto* o *compound*.

40.2. POTENCIA ELÉCTRICA TRANSFORMADA EN MECÁNICA. PAR MOTOR. RENDIMIENTO.

Supongamos un motor de las siguientes características:

- Sistema inductor con **2p** polos.
- Devanado del inducido con **n** conductores activos y **2c** derivaciones.
- Flujo neto por polo **Φ.**

Si el inducido absorbe una corriente de intensidad **I**, por cada derivación circulará **I/2c**. Un conductor, perteneciente a una derivación, en cada giro del rotor corta **2p** veces el flujo **Φ.** El trabajo desarrollado por dicho conductor es:

$$W = \frac{I}{2c} 2p.\Phi = \Phi.I.\frac{p}{c} \ (J.rev^{-1}) \qquad (40.1)$$

Pero como hay **n** conductores activos, el trabajo total desarrollado es:

$$W_T = n.W = n.\Phi.I.\frac{p}{c} \ (J.rev^{-1}) \qquad (40.2)$$

Si el rotor gira a **N** revoluciones por segundo, la potencia desarrollada es:

$$P = N.n.\Phi.I.\frac{p}{c} \quad (W) \qquad (40.3)$$

Pero según se ha razonado más arriba, al girar el inducido aparece una fuerza contraelectromotriz, cuyo valor coincide con la fuerza electromotriz de la dínamo, al tratarse de una máquina reversible:

$$E' = n.N.\Phi.\frac{p}{c} \quad (V) \qquad (40.4)$$

Si se compara (40.3) con (40.4) se deduce que:

$$P = E'.I \quad (W) \qquad (40.5)$$

La potencia mecánica desarrollada por el inducido es:

$$P = F.v \quad (W) \qquad (40.6)$$

Siendo:

F : La fuerza tangencial.
v : La velocidad tangencial.

Pero por tratarse de un movimiento circular uniforme:

$$v = \omega.r \quad (m.s^{-1}) \qquad (40.7)$$

Siendo:

ω : Velocidad angular ($rd.s^{-1}$)
r : Radio de giro (m)

Por tanto (40.6) se puede expresar de la forma:

$$P = F.r.\omega \quad (W) \qquad (40.8)$$

Pero:

$$F.r = C \quad (N.m) \qquad (40.9)$$

$$\omega = 2.\pi.N \quad (rd.s^{-1}) \qquad (40.10)$$

Siendo:

N : El número de revoluciones por segundo del rotor.

Por tanto sustituyendo (40.9) y (40.10) en (40.8) resulta:

$$P = 2.\pi.N.C \quad (W) \tag{40.11}$$

Como la potencia mecánica (40.11) desarrollada por el motor, tiene que ser igual a la calculada de forma eléctrica (40.3), se verifica:

$$N.n.\Phi.I.\frac{p}{c} = 2.\pi.N.C \tag{40.12}$$

Despejando **C** de (40.12), resulta:

$$C = \frac{n.\Phi.I}{2.\pi}.\frac{p}{c} \quad (N.m) \tag{40.13}$$

donde:

I : Amperios (A).
Φ : weber (Wb).
C: Newton por metro (N.m)

La Fig.40.2 establece el balance de potencias de un motor de corriente continua.

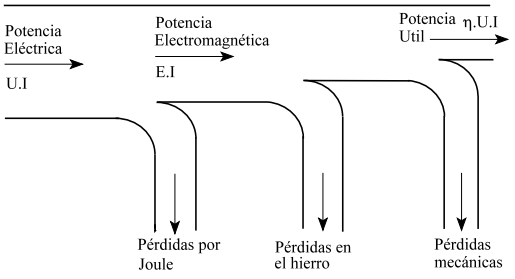


Fig.40.2

La potencia que absorbe el motor de la red (U.I), se reparte de la siguiente forma:

- ☞ Parte se pierde por Joule en los devanados del inducido, y en las escobillas.
- ☞ Parte de pierde en los núcleos de hierro, por histéresis y Foucault.
- ☞ Parte se pierde en rozamientos, ventilación, etc.

Se denomina *rendimiento total* del motor de corriente continua, a la relación:

$$\textit{Rendimiento total} = \frac{\textit{Potencia útil}}{\textit{Potencia eléctrica}}$$

Se denomina *rendimiento eléctrico* del motor de corriente continua, a la relación:

$$\textit{Rendimiento eléctrico} = \frac{\textit{Potencia electromagnética}}{\textit{Potencia eléctrica}}$$

Los valores que figuran en las expresiones anteriores, son distintos según el tipo de conexión del motor.

40.2.1 MOTOR SERIE.

El esquema eléctrico del motor serie está representado en la Fig.40.3.

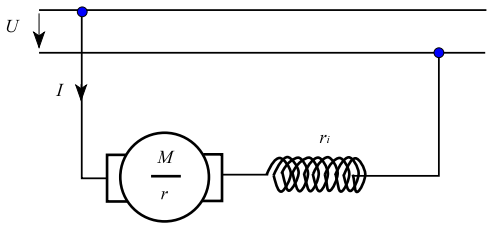


Fig.40.3

Las expresiones que definen las características del motor son:

$$\textit{Potencia eléctrica} = U.I$$

$$\textit{Potencia electromagnética} = E'.I$$

$$\textit{Pérdidas mecánicas y en el hierro} = a$$

$$\textit{Potencia útil} = E'.I - a$$

$$\textit{Rendimiento total} = \eta_t = \frac{E'.I - a}{U.I}$$

$$\textit{Rendimiento eléctrico} = \eta_e = \frac{E'.I}{U.I} = \frac{E'}{U}$$

40.2.2 MOTOR DERIVACIÓN (SHUNT).

El esquema eléctrico del motor derivación está representado en la Fig.40.4.

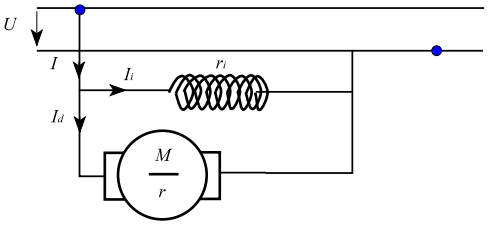


Fig.40.4

Las expresiones que definen las características del motor son:

$$\textit{Potencia eléctrica} = U.I$$

$$\textit{Potencia electromagnética} = E'.I_d$$

$$\textit{Pérdidas mecánicas y en el hierro} = a$$

$$\textit{Potencia útil} = E'.I_d - a$$

$$\textit{Rendimiento total} = \eta_t = \frac{E'.I_d - a}{U.I}$$

$$\textit{Rendimiento eléctrico} = \eta_e = \frac{E'.I_d}{U.I}$$

40.2.3 MOTOR COMPUESTO (COMPOUND).

El esquema eléctrico del motor compuesto está representado en la Fig.40.5.

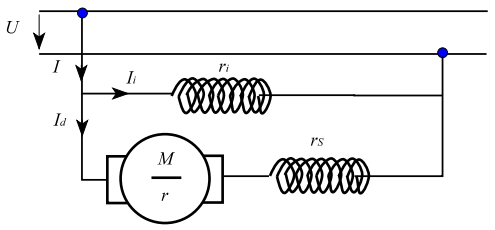


Fig.40.5

Las expresiones que definen las características del motor son:

$$\textit{Potencia eléctrica} = U.I$$

$$\textit{Potencia electromagnética} = E'.I_d$$

$$\textit{Pérdidas mecánicas y en el hierro} = a$$

$$\textit{Potencia útil} = E'.I_d - a$$

$$\textit{Rendimiento total} = \eta_t = \frac{E'.I - a}{U.I}$$

$$\textit{Rendimiento eléctrico} = \eta_e = \frac{E'.I_d}{U.I}$$

40.3. ARRANQUE DE LOS MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA.

En el funcionamiento de los motores de corriente continua cabe señalar las siguientes fases:

- ✏ Puesta en marcha
- ✏ Puesta en velocidad.
- ✏ Régimen normal.

Puesta en marcha.

A partir del instante en que se conecta el motor a una fuente de corriente continua, aparecen dos pares:

1º) Par motor de puesta en marcha, $\mathbf{C_{ma}}$.
2º) Par resistente de puesta en marcha $\mathbf{C_{ra}}$, constituido por el par antagonista de la máquina accionada por el motor eléctrico, así como los rozamientos y ventilación.

Para que el motor arranque, tiene que verificarse:

$$C_{ma} > C_{ra}$$

Puesta en velocidad (arranque).

Cuando comienza a girar el motor, al par resistente se le suma el par de inercia del conjunto. El par total será:

$$C_r + I.\frac{d\Omega}{dt}$$

donde:

C_r Par resistente.
$I.d\Omega/dt$ Par de inercia.
I Momento de inercia de las partes móviles.
Ω Velocidad angular.

En el equilibrio se tiene que cumplir:

$$C_m = C_r + I.\frac{d\Omega}{dt} \qquad (40.14)$$

Marcha en régimen.

Cuando el motor adquiere velocidad constante, se dice que está en régimen normal de funcionamiento. Entonces se verifica:

$$\Omega = C^{te} \quad \Rightarrow \quad \frac{d\Omega}{dt} = 0 \qquad (40.15)$$

Por tanto (40.14) se reduce a:

$$C_m = C_r \qquad (40.16)$$

Como la velocidad del motor y de la máquina, o dispositivo que acciona, son las mismas:

$$P_m = P_r \qquad (40.17)$$

Es decir, la potencia que desarrolla el motor es la misma que la que absorbe la máquina, o dispositivo accionado por el motor.

En la Fig.40.6 se ha representado la variación de los pares motor y resistente, con la velocidad. El régimen normal de funcionamiento se produce en el punto **P**, para la velocidad de régimen $\mathbf{N_r}$.

Si la velocidad disminuye con respecto a $\mathbf{N_r}$, el par motor **(a')** es mayor que el resistente **(b')**, el motor aumenta de velocidad y tiende al punto de equilibrio **P**. Si por el contrario, la velocidad aumenta, el par resistente **(b")** es mayor que el par motor **(a")** y el motor disminuirá su velocidad hasta alcanzar el punto de equilibrio **P**.

En definitiva, el grupo motor-máquina es estable, ya que cualquier variación de velocidad respecto a $\mathbf{N_r}$ supone una reacción entre los pares que tienden a estabilizarlo de nuevo.

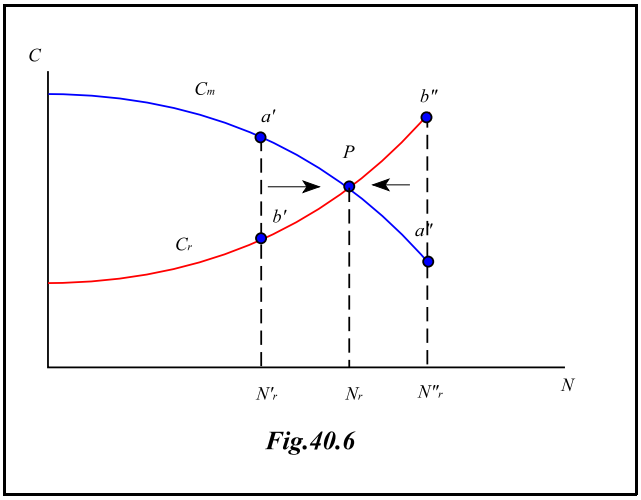


Fig.40.6

40.4. COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO EN EL ARRANQUE.

En el momento de arrancar el motor su velocidad es nula, y por tanto también la fuerza contraelectromotriz (E' = 0). La intensidad que recorre el inducido, una vez alcanzada la velocidad de régimen, está dada por las expresiones que figuran en la Tabla 40.1, para los distintos tipos de motores.

Tabla 40.1. Intensidad que absorben los distintos tipos de motores de corriente continua.

Tipo de motor	Fórmula
Serie	$I_d = \frac{U - E'}{r + r_s}$
Derivación	$I_d = \frac{U - E'}{r}$
Compuesta	$I_d = \frac{U - E'}{r + r_s}$

En el momento del arranque, y para los tres casos, toda la tensión de la línea se aplica a las resistencias del inducido, o inducido e inductor, en su caso. Estas resistencias son pequeñas, por lo que $\mathbf{I_a}$ tomará valores elevados (del orden de 2,5 veces el valor nominal). Esto tal como se ha expuesto, significaría el deterioro del motor a corto plazo, sin embargo, para solventar el problema se colocan resistencias en el período de arranque, hasta que aparece la fuerza contraelectromotriz del motor, y en ese momento se pueden eliminar. Estas resistencias variables reciben el nombre de *reóstatos de arranque* y se colocan en serie con el inducido.

En la Fig.40.7 se ha representado la situación de los reóstatos de arranque para los motores derivación y serie.

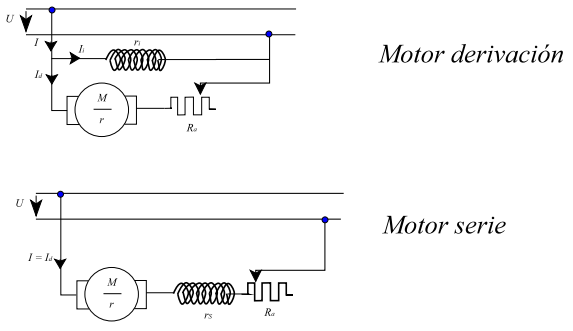


Fig.40.7

Las intensidades que absorben los inducidos de los motores son:

a) Motor derivación: $I_d = \frac{U-E'}{r+R_a}$ b) Motor serie: $I_d = \frac{U-E'}{r+r_s+R_a}$

40.5. REGULACIÓN DE VELOCIDAD.

La principal ventaja de los motores de corriente continua es la facilidad con que se puede modificar su velocidad.

Supongamos un motor derivación, definido por las siguientes expresiones:

$$E' = n.N.\Phi.\frac{p}{c} \qquad C = \frac{n.\Phi.I_d}{2.\pi}.\frac{p}{c}$$

$$I_d = \frac{U - E'}{r} \qquad N = \frac{U - r.I_d}{n.\Phi.\frac{p}{c}} \qquad (40.18)$$

La cuarta expresión de (40.18) indica que es muy estable la velocidad del motor para una intensidad de excitación constante. En efecto, el aumento del par resistente implica que se produce un aumento de la intensidad que circula por el inducido y por ende, un incremento en la reacción del inducido, lo que ocasiona una disminución del flujo útil por polo. Esta disminución hace que disminuya ligeramente el denominador de la citada expresión, pero esto va asociado también a una disminución del numerador, al aumentar la caída de tensión en el inducido, con lo que la fracción se mantiene prácticamente constante, y la velocidad también. De forma análoga una disminución del par resistente, significa un aumento del flujo útil por polo, pero también una disminución de la caída de tensión. En definitiva la velocidad también se mantiene.

Ahora bien, si se disminuye la intensidad de excitación se reduce el flujo producido en los polos inductores, con lo que se consigue aumentar la velocidad. Es decir en el motor derivación al disminuir el flujo inductor se aumenta la velocidad del rotor. Para conseguir esta disminución habría que intercalar, en el circuito de excitación, una resistencia variable (reóstato de excitación), que permitiera modificar la intensidad de excitación y por ende la velocidad del rotor.

Con objeto de facilitar el arranque, se intercala una resistencia en serie con el inducido, de forma que la intensidad que circule en el arranque sea pequeña, al aumentar el denominador de la tercera fórmula de (40.18). Una vez que el motor ha empezado a girar, aparece una fuerza contraelectromotriz **(E')** que contrarresta la tensión de línea **(U)**, con lo que disminuirá el

numerador de dicha fracción, y en consecuencia se puede eliminar esta resistencia adicional, sin que por ello la intensidad crezca excesivamente.

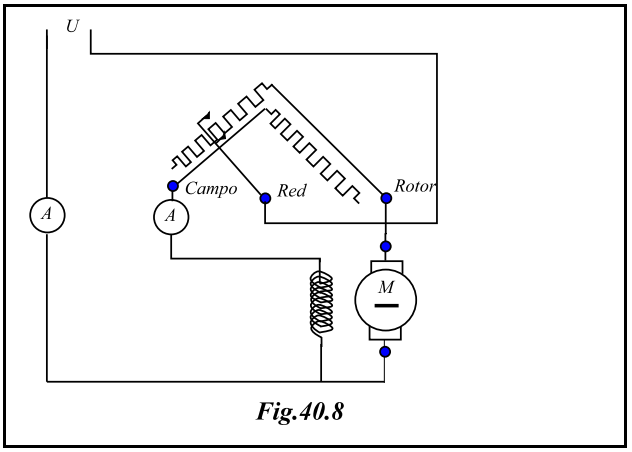


Fig.40.8

La velocidad del rotor se puede modificar intercalando en serie con el inductor un reóstato, tal como se indica en la Fig.40.8, con lo que se podrá modificar la resistencia del circuito de excitación y en consecuencia el flujo inductor. Una modificación de dicho flujo hará que se modifique el denominador de la cuarta expresión (40.18), y en consecuencia la velocidad.

Las dos resistencias se pueden combinar mediante un reóstato tal como se indica en la Fig.40.8.