

LA MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

La máquina de corriente continua es esencialmente un alternador, es decir un generador de corriente alternada, dotado de un rectificador mecánico llamado "conmutador".

De esta forma, cuando la máquina de corriente continua trabaja como generador, no envía a la carga una corriente continua pura, sino, una corriente unidireccional y pulsante.

La máquina de corriente continua posee una estructura electromagnética como la indicada en la Figura 1.

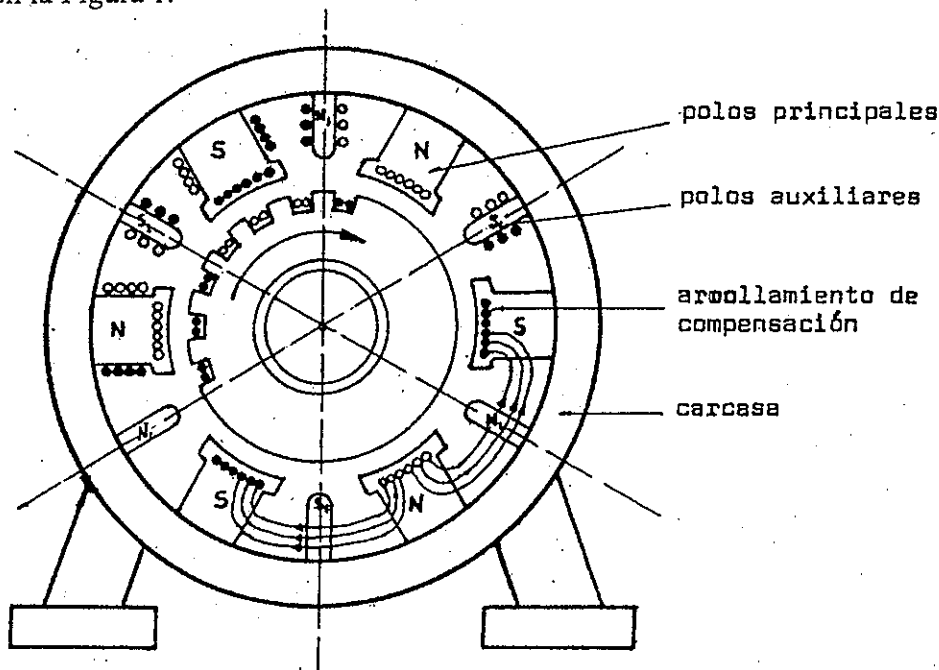


Fig. 1

En la figura 1 puede observarse que la "carcasa" de la máquina representa también una parte del circuito magnético, que en el caso de estas máquinas es macizo, ya que el flujo magnético que lo recorre es constante en el tiempo. (Flujo continuo)

El material con el que está construida esta parte de la máquinas, en general, una plancha de hierro dulce doblada y soldada, o fundición de acero.

En el caso de material soldado conviene hacer la soldadura en correspondencia con el centro de un "polo principal", donde prácticamente la inducción magnética es nula.

La carcasa de la máquina además de participar en el circuito magnético, debe poseer la suficiente rigidez mecánica como para garantizar su indeformabilidad.

En grandes máquinas esta parte del circuito magnético se construye de acero fundido. La fundición desde hace tiempo se ha dejado de lado. Si es de acero fundido conviene controlar la calidad del material con referencia a posibles sopladuras escondidas que pueden afectar la homogeneidad del circuito magnético, influyendo, así, sobre la constancia de la reluctancia del mismo.

Luego de la corona magnética exterior, que constituye la carcasa de la máquina, el circuito magnético continúa con los "polos principales", que en general, se construyen con chapa de hierro dulce laminado y pueden tener distintas formas, según las características de la máquina.

Luego de los "polos principales" el circuito magnético continúa con el "entrehierro", huelgo de aire que separa el estator del rotor, que en las máquinas de corriente continua es, por lo general, constante y solamente precisa una variación en los bordes de las expansiones polares para hacer de manera que el campo magnético del ingreso del diente rotórico a esa zona no resulte brusco, lo que aumentaría las pérdidas magnéticas. En algunos casos para hacer más gradual la entrada del diente bajo el polo, se inclinan las canaletas.

El rotor de la máquina de corriente continua está sometido a un flujo magnético alterno de una frecuencia dada por.

$$f = \frac{p \cdot n}{120} \quad (1)$$

f = Frecuencia (Hz)

p = Número de polos

n = Velocidad angular (r.p.m.)

A raíz de esta circunstancia se generan pérdidas magnéticas, lo que obliga a construir el rotor laminado, utilizando chapa de hierro al silicio con pérdidas aproximadas de 2 W/Kg.

Las ranuras de los dientes rotóricos son casi siempre abiertas con el objeto de reducir la reactancia inductiva de los elementos que están conmutando la corriente.

También puede observarse en la Figura 1 que entre los "polos principales" existen polos más pequeños, llamados "polos auxiliares", cuya función es la de facilitar la "conmutación", como se verá más adelante.

Como los "polos auxiliares" poseen un bobinado recorrido por la corriente de carga de la máquina, concatenan un flujo magnético variable, según varíen las condiciones de carga de la máquina. Se pueden construir con material macizo, si estas variaciones no son bruscas y frecuentes, pero si se prevén frecuentes y fuertes variaciones de la corriente de carga, es entonces aconsejable, hacerlos laminados, evitando, en lo posible, que se "saturen", razón por la cual se adoptan bajo los "polos auxiliares", entrehierros más grandes que bajo los "polos principales".

Dentro de las ranuras del rotor se aloja el bobinado del "inducido", generalmente en dos capas, cuyos terminales van soldados al "colector", que constituye la parte más delicada en la construcción de la máquina.

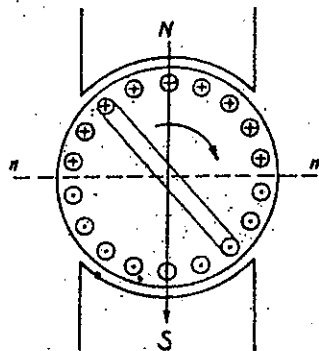


Fig. 2

Sobre los "polos principales" se aloja el "bobinado inductor", los eventuales "bobinados serie" y demás bobinados destinados al control del flujo principal, si es que existen

Observando la Fig. 2 y tratándose de un generador en que la intensidad de corriente se establece en el sentido de la fuerza electromotriz, resulta un sentido de circulación de corriente tal como se denota en la Figura 2.

Ese sentido de circulación se mantiene mientras los lados activos se encuentren en los sectores delimitados por la "línea neutra". La "línea neutra" es la línea natural de división de la corriente. ($n-n'$ en la figura 2)

Los puntos y cruces convencionales de la figura 2 indican, como ya se dijo, el sentido de la fuerza electromotriz inducida en cada una de las semibobinas activas, así como el sentido de la corriente cuando la máquina funciona como generador.

Debe aclararse que la figura 2 es esquemática ya que la máquina se bobina en dos capas (una superior y otra inferior en cada ranura), pero en vez del único conductor por ranura indicado, pueden existir en cada capa, dos, cuatro, seis, o más semibobinas en cada ranura.

La figura 3 muestra el sentido de la fuerza electromotriz en un devanado de dos capas, cuando la máquina trabaja como generador, para una máquina de dos polos y de cuatro polos.

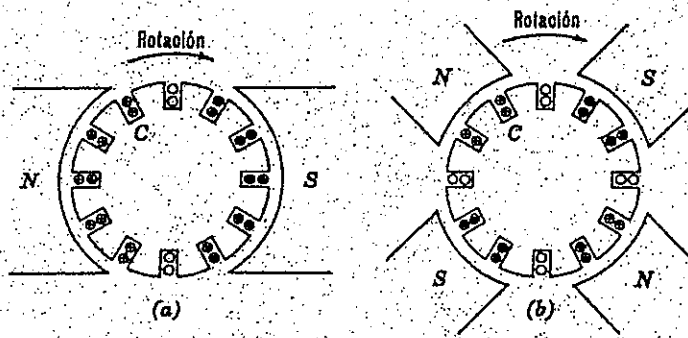


Fig. 3

Se puede comprobar que tanto el sentido de la fuerza electromotriz, como de la corriente, se invierte cada vez que la semibobina pasa por el "eje neutro" magnético situado a igual distancia de las extremidades polares adyacentes, de tal forma que, en lo que a su funcionamiento interno se refiere, la máquina es, esencialmente un generador de corriente alternada.

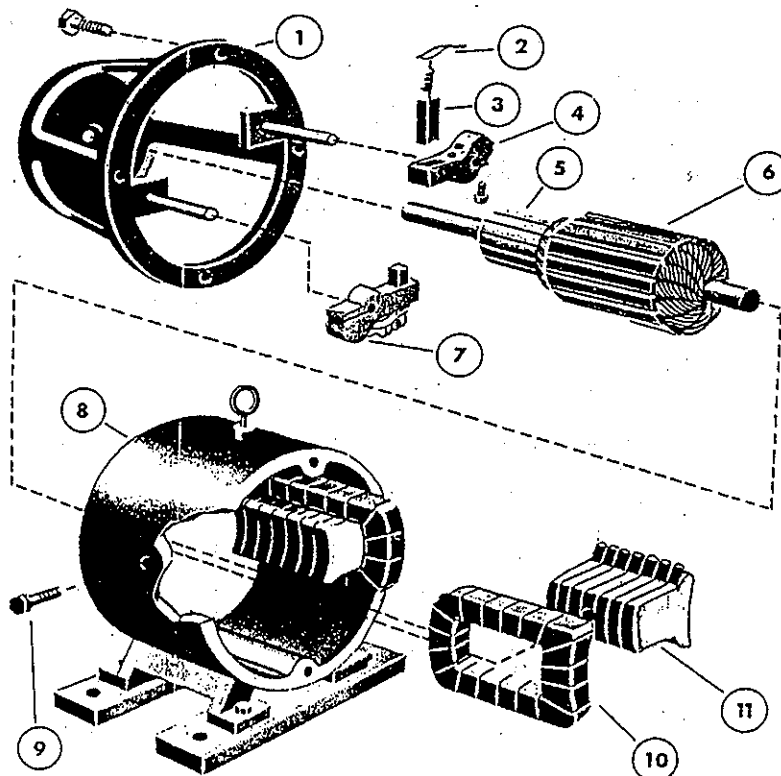


Fig. 4

Los elementos básicos constitutivos de una máquina de corriente continua son los mostrados en la figura 4, donde: 1) Casquete, o tapa 2) Muelle de la escobilla 3) Escobilla 4) Portaescobilla 5) Colector 6) Inducido 7) Escobilla montada en la pieza portador 8) Carcasa 9) Perno para sujetar el polo inductor 10) Bobina inductora 11) Masa polar de chapa laminada.

La función de válvula rectificadora la realiza el "colector", que sirve para conmutar las bobinas individuales de una banda de conductores sujetos a la influencia de un polo de la máquina hacia la banda adyacente.

El "colector" consiste en segmentos de cobre duro en forma de cuña, llamados "delgas", completamente aislados unos de otros, así como del eje de apoyo, por medio de piezas de mica moldeadas, constituyendo, de esta forma un arco circular, como se muestra en la figura 5.

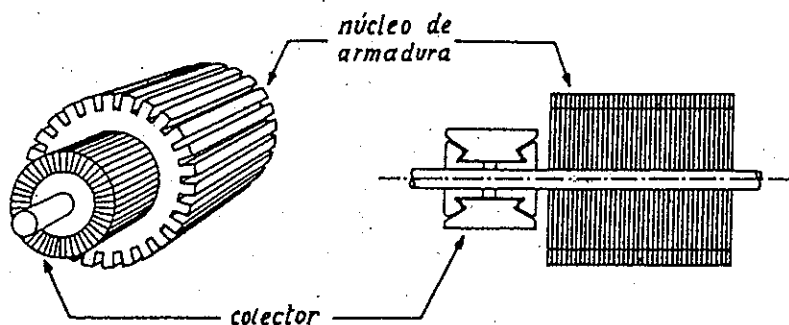


Fig. 5

Las "delgas" modernas son piezas de cobre electrolítico cuya sección tiene forma de cuña, quedando separadas por una delgada capa de material aislante resistente a las altas temperaturas (mica), detalle éste de gran importancia, dado que las corrientes parásitas y las chispas contribuyen a que el colector se caliente considerablemente. La figura 6 muestra la estructura y el montaje de una delga.

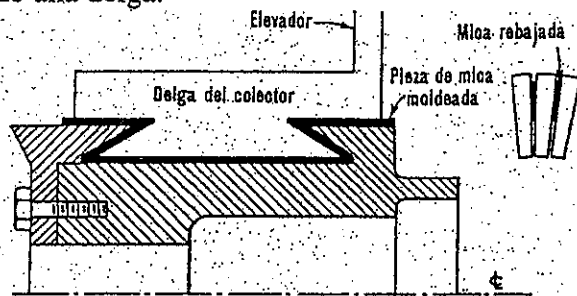


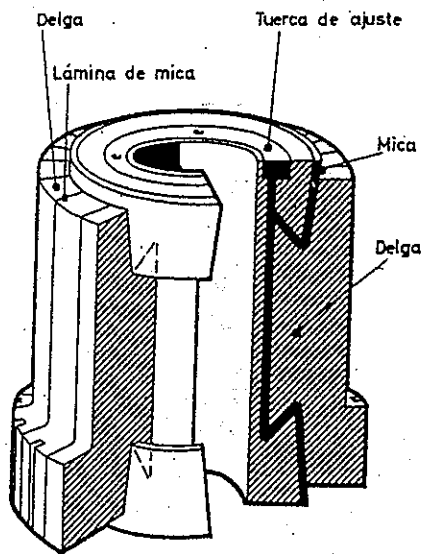
Fig. 6

La figura 7 muestra la estructura general de un "colector" y un inducido de colector radial, donde pueden observarse los aspectos constructivos.

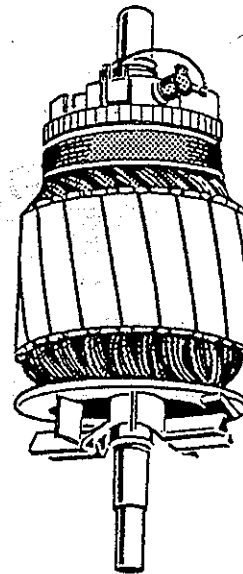
Las "escobillas" que rozan sobre las "delgas", son los agentes colectores de las corrientes que se generan en el "inducido" de la máquina y las transmiten al circuito exterior.

Su nombre proviene de la primitiva estructura de este elemento, que no era otra cosa que un mechón de alambre de cobre que barría la superficie del colector, como si fuera una pequeña escoba.

Su nombre ha prevalecido, pero su forma y construcción en nada recuerda a aquella pequeña escoba de antaño, que entre otros inconvenientes contaba el de desgastar rápidamente las delgas del colector.



Estructura general de un colector.



Inducido de colector radial.

Fig. 7

Se buscaron otros materiales menos duros y con buena conductividad y se acabó por llegar al carbón de retorta y al grafito. Modernamente se han ensayado y se emplean con éxito escobillas formadas por una mezcla de polvo de cobre, grafito y carbón de retorta.

Las "escobillas" suelen ser cuerpos prismáticos de sección rectangular, cuyo área de contacto depende de la intensidad de corriente que deba soportar la escobilla. Los constructores acostumbran a informar sobre la "capacidad de carga" admisible de cada tipo de escobilla, dada en Amperios por centímetro cuadrado.

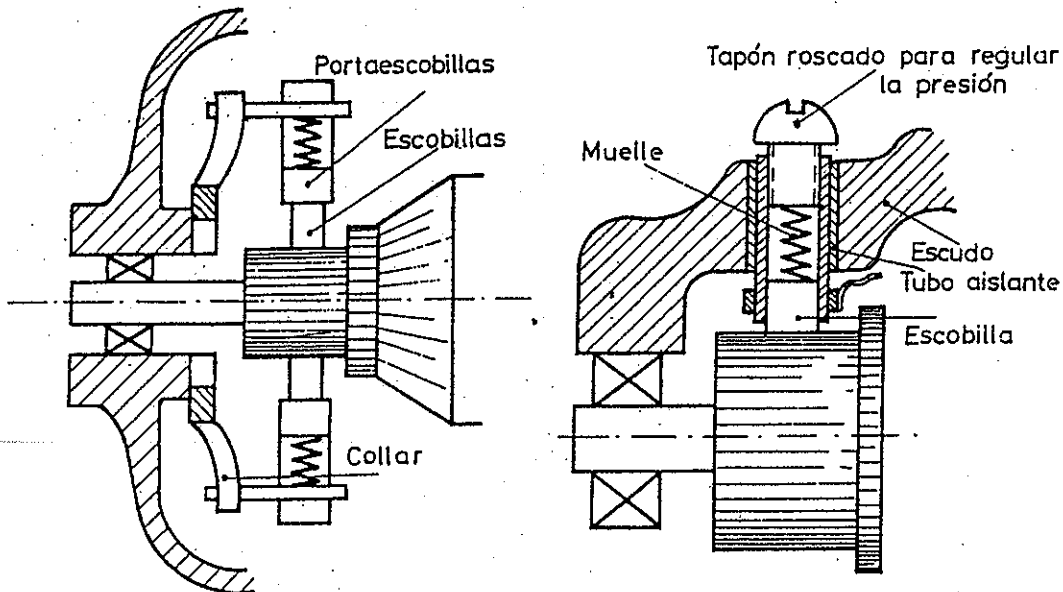


Fig. 8

Cuando la intensidad de corriente es muy elevada (lo que implicaría el empleo de escobillas de gran tamaño) se resuelve el problema conectando en paralelo varias escobillas de pequeña sección. Esta solución, empero, tiene límites impuestos por las dificultades constructivas y el considerable gravamen económico.

Las "escobillas" se montan en un dispositivo denominado "portaescobillas", en el que podemos distinguir dos partes esenciales: el "collar" y el "portaescobillas" propiamente dicho, como puede observarse con mucha claridad en la figura 8.

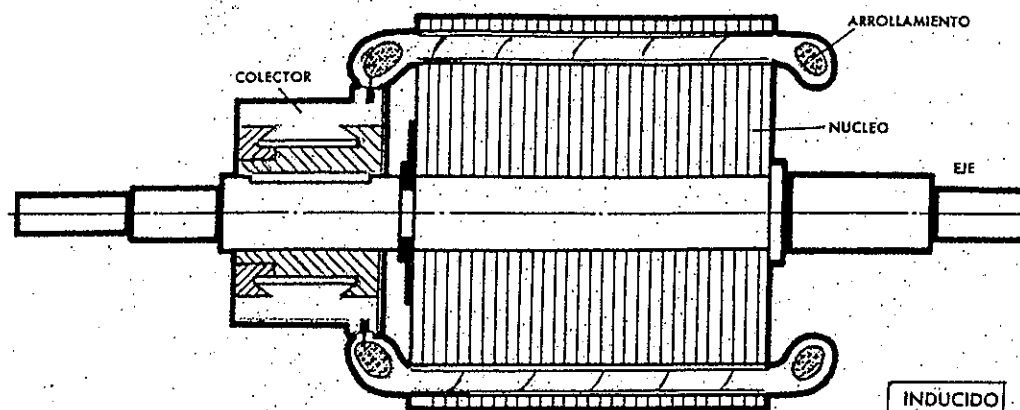


Fig. 9

En la figura 9 podemos observar un aspecto general del "inducido", o "armadura" de una máquina de corriente continua.

Proceso de conmutación

El "conmutador" consta de dos partes esenciales. Una de ellas está constituida por las llamadas "delgas" y la otra por las "escobillas". Las "delgas" rozan continuamente contra las "escobillas" de carbón, a través de las cuales llevan la corriente al circuito de carga.

La figura 10 ilustrará claramente cual es el principio de funcionamiento del "conmutador"

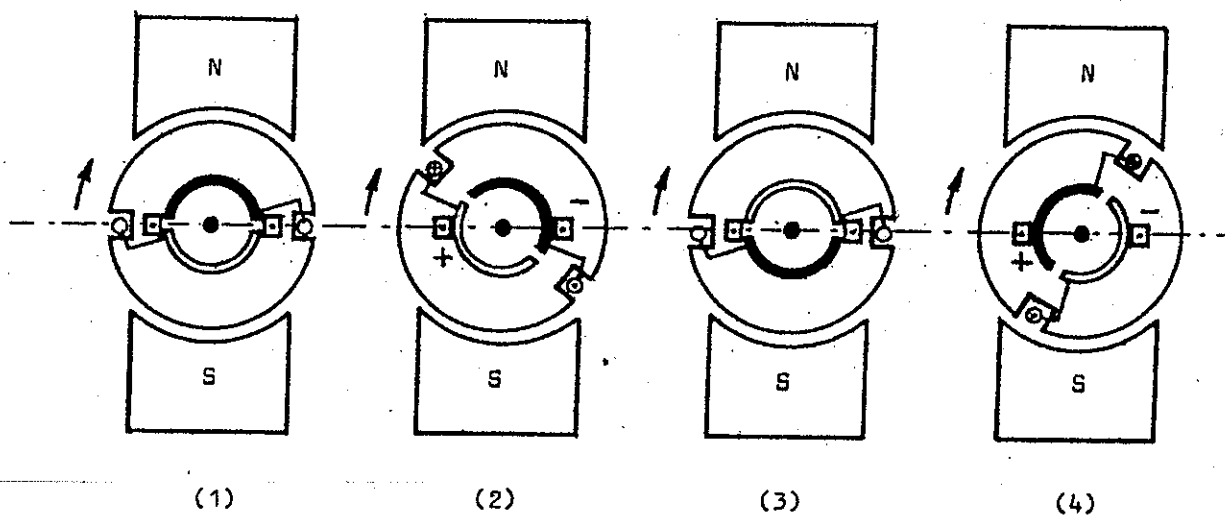


Fig. 10

La figura 10 muestra un sola espira del "inducido" cuyos extremos están soldados a las únicas dos delgas, una negra y la otra blanca para poder diferenciarlas.

En la posición (1), debido a que los conductores activos de la espira no cortan las líneas de campo, no se induce en las escobillas fuerza electromotriz alguna y, por lo tanto, no existe circulación de corriente.

En la posición (2), los conductores cortan a las líneas de flujo magnético generado por el arrollamiento inductor y entonces aparece una fuerza electromotriz en las escobillas de la polaridad indicada en la figura 10, la cual se obtiene de aplicar la regla de la "mano derecha", haciendo que la escobilla de la izquierda tenga signo "positivo" y la de la derecha, signo "negativo"

La "regla de la mano derecha" dice: "Suponiendo que nuestra mano derecha se extienda perpendicular al campo magnético principal generado por el arrollamiento inductor de la máquina, de forma tal que las líneas de fuerza del campo penetren por la palma de la mano, cuando el dedo pulgar señale el sentido del movimiento del conductor, la corriente inducida tendrá el sentido que señalan los demás dedos de la mano", tal como muestra en detalle la figura 11.

En la posición (3) la espira ha sufrido un giro de 180° . Tampoco en estas circunstancias se induce en las "escobillas" fuerza electromotriz alguna, ya que los conductores no cortan líneas de flujo, repitiéndose la situación de la posición (1)

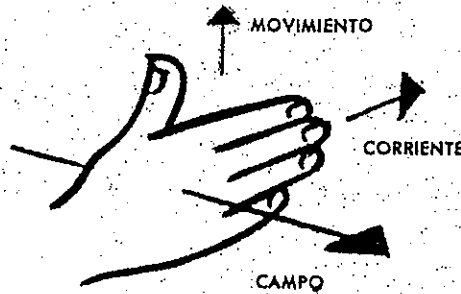


Fig. 11

En la posición (4) la fuerza electromotriz generada internamente por la máquina tendería a cambiar de sentido, pero simultáneamente, como lo indica la figura, también cambian su posición de contacto las delgas con las escobillas y, por lo tanto, esta doble inversión hace que se mantenga inalterable la polaridad de cada una de las escobillas.

De este modo se logra generar una fuerza electromotriz unidireccional y pulsante, tal como muestra la figura 12.

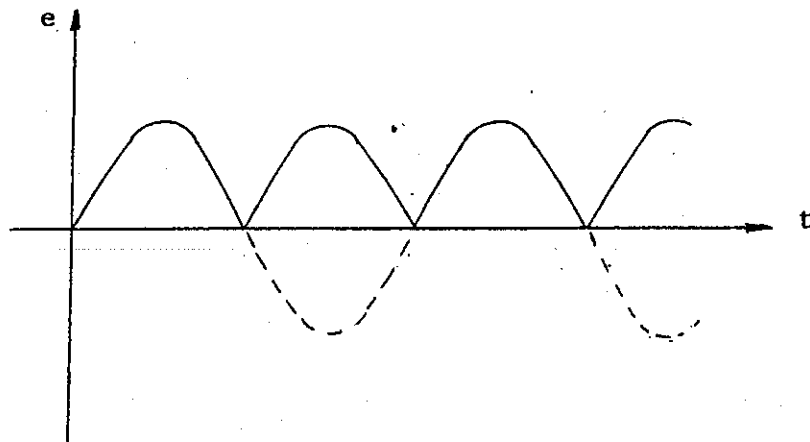


Fig. 12

Para lograr que la corriente sea realmente continua, o sea, lo menos pulsante posible y además obtener entre las escobillas el valor de la fuerza electromotriz deseada, es que en la

práctica la máquina no posee una sola espira, sino muchas espiras conectadas en serie, formando una sola bobina continua.

Como las bobinas están decaladas entre sí un determinado ángulo, hallándose todas uniformemente distribuidas sobre la periferia del rotor, no alcanzan simultáneamente los valores máximos, con lo que se logra que al sumar las fuerzas electromotrices en serie, que la fuerza electromotriz medida entre las escobillas sea prácticamente continua, tal como muestra la figura 13.

De esta forma vemos que aumentando el número de bobinas la fuerza electromotriz será cada vez más continua, hasta que en la práctica, la pulsación (ripple) resulta despreciable.

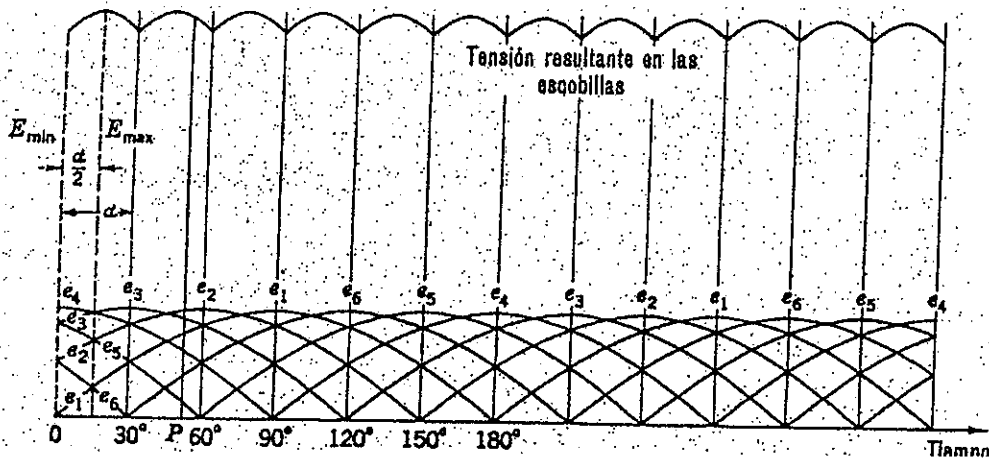


Fig. 13

Condición de fuerza electromotriz máxima

Los conductores distribuidos regularmente en la periferia del rotor de la máquina, tienen diferencias de fase tales que sus fuerzas electromotrices se suceden en el orden: $0, e_1, e_2, e_3, \text{etc.}$

Si desarrollamos en forma lineal los conductores de la periferia del rotor, la distribución de la fuerza electromotriz de cada una de ellos, tendría una forma senoidal tal como la mostrada en la figura 14, y de acuerdo con el sentido de giro utilizado los conductores que enfrentan al polo Norte serán positivos y los que enfrentan al polo Sur, serán negativos.

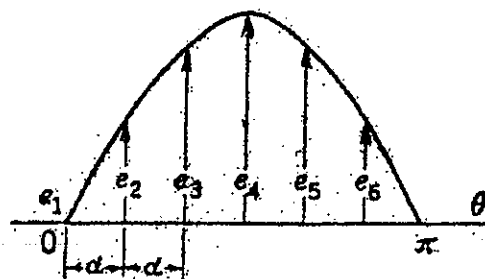


Fig. 14

Si a todos los conductores cuya distribución de las fuerzas electromotrices representamos en la figura anterior, los conectamos en "serie" entre sí, sus fuerzas electromotrices se sumarían algebraicamente, dando una curva como la que puede observarse en la Figura 15.

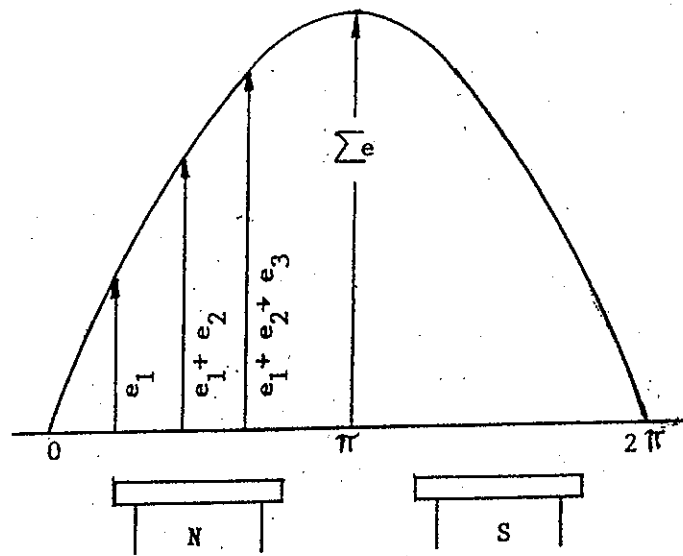


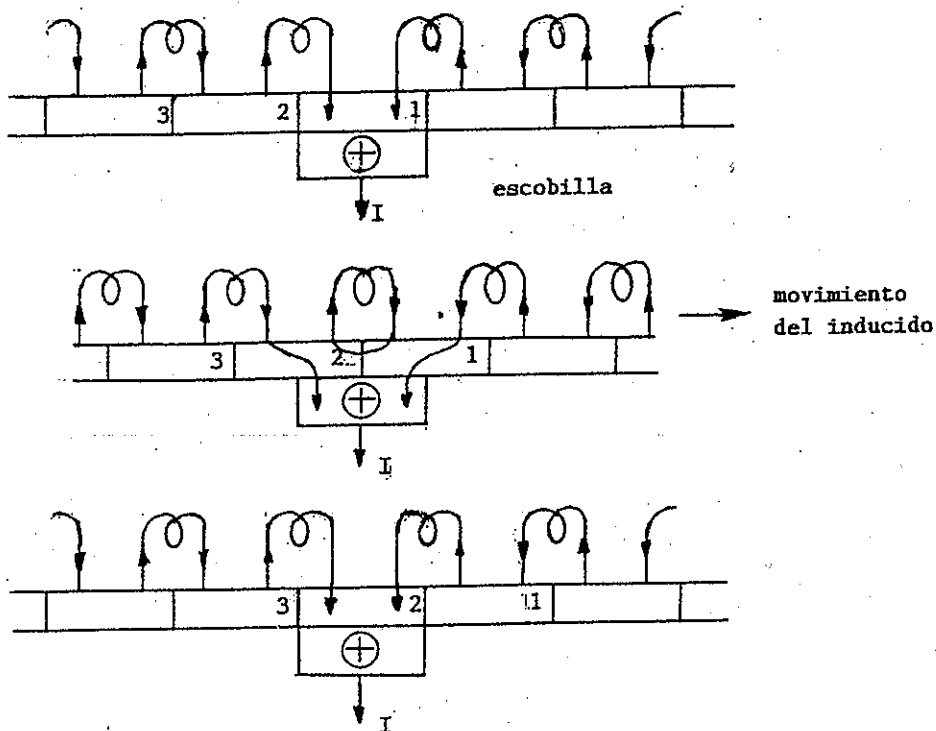
Fig. 15

La figura anterior ilustra claramente la sumatoria de las fuerzas electromotrices y, es evidente, que la máxima diferencia de potencial se produce entre los puntos 0 y π .

Luego, las escobillas se colocan sobre las delgas de conductores que conmuten sobre la "línea neutra", para que entre ellas se establezca la máxima diferencia de potencial y, además, para que la fuerza electromotriz entre delgas adyacentes, entre las cuales se produce la conmutación, sea nula.

Si además, analizamos la figura 16, notamos palmariamente, que la "línea neutra" es la línea natural de conmutación de la corriente, lo cual, es una razón más que justifica la ubicación de las escobillas sobre la línea neutra.

La figura 16 ilustra claramente las etapas sucesivas del proceso de conmutación.



Etapas sucesivas de la conmutación

Fig. 16

Para mejor proveer explicaremos la Figura 17 para comprender claramente sobre que "delgas" debemos situar las "escobillas".

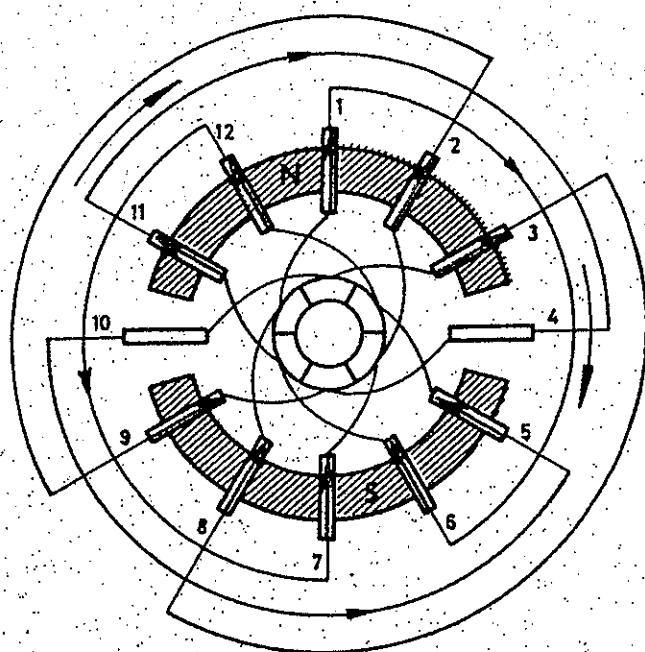


Fig. 17

- a) Con una flecha se indica el sentido de la corriente inducida en cada uno de los conductores sometidos a la acción magnética de los polos inductores.
- b) Empezamos a recorrer el devanado partiendo de un conductor cualquiera, por ejemplo el número 1. Representaremos cada conductor activo con el símbolo de resistencia y cada delga con un pequeño rectángulo con los lados horizontales algo prolongados.

Las corrientes de los conductores 1 - 6 -11 se suman ya que el sentido es el mismo. Pero, siguiendo el devanado, vemos que el conductor 11 enlaza con el 4 (neutro) y éste con el 9.

En este último conductor la corriente tiene signo contrario. Luego, en la delga que une el conductor 4 con el 9 debemos colocar una "escobilla". En dicha escobilla tendremos el polo "positivo" del generador, toda vez que la corriente inducida "sale" de la escobilla.

Si seguimos recorriendo el arrollamiento se observa que la corriente no cambia de sentido hasta llegar al conductor 3. Entre los conductores 10 y 3 tendremos una delga donde coinciden dos corrientes divergentes.

Por lo tanto, sobre esa delga ubicaremos la otra "escobilla", que será, naturalmente el polo "negativo del generador, toda vez que la corriente "entra" por esa "escobilla". La figura 18, ilustra al desarrollar la máquina en un plano, lo anteriormente explicado

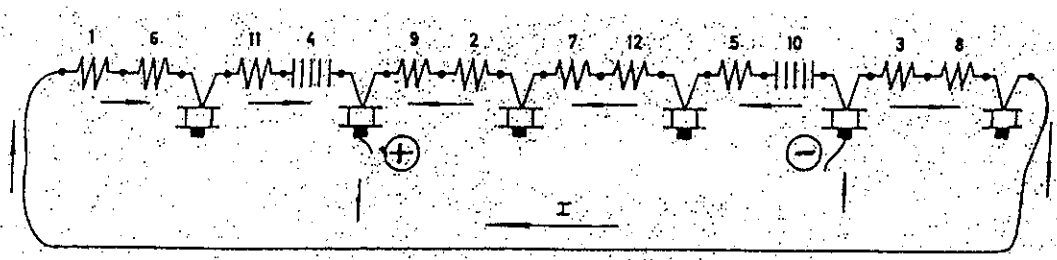


Fig. 18

El esquema del circuito desarrollado en la figura anterior, también puede disponerse en dos ramas en "paralelo", tal como se muestra en la Figura 19.

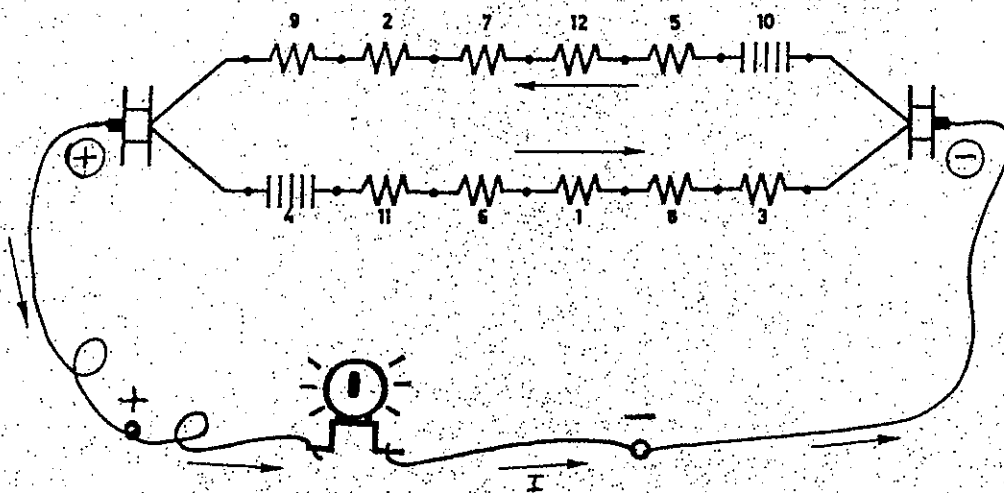


Fig. 19

Fórmula de la fuerza electromotriz

La expresión:

$$e = B.l.v \quad (2)$$

Indica que la fuerza electromotriz producida por el movimiento de un conductor de longitud " l " en el seno de un campo magnético de inducción " B ", es igual al flujo magnético barrido por el conductor en la unidad de tiempo, puesto que " l.v ", indica el área barrida en la unidad de tiempo.

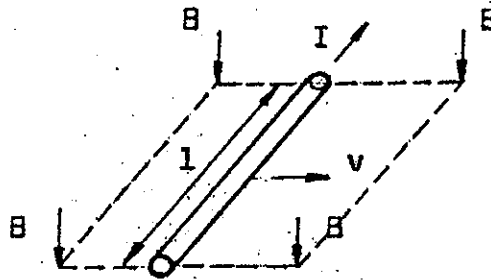


Fig. 20

La fórmula (2) puede adaptarse al caso del movimiento de rotación. Supongamos que el flujo magnético por polo de la máquina sea " ϕ ", que la máquina posea " p " polos y que el conductor gire a una velocidad angular de " n " revoluciones por minuto.

Luego, el conductor corta " ϕ " unidades de flujo magnético en la extensión de un polo, " p. ϕ " unidades de flujo magnético en una vuelta y " n.p. ϕ / 60 " unidades de flujo magnético en 1 segundo.

Luego, el valor medio de la fuerza electromotriz media inducida por la rotación de un conductor colocado en la periferia del rotor de la máquina, vendrá dada por:

$$e_{\text{media}} = \frac{n.p.\phi}{60} \quad (3)$$

En el caso de las máquinas de corriente continua habrá " Z " conductores totales en la periferia del rotor, generalmente distribuidos en " a " ramas en paralelo, siendo " a " por lo menos igual a 2.

Luego, la expresión de la fórmula (3) quedará multiplicada por los " Z/a " conductores periféricos unidos en serie, de donde la expresión de la fuerza electromotriz media inducida vendrá dada, por:

$$E = \frac{z \cdot n}{a \cdot 60} p \phi = K \cdot n \cdot \phi \quad (4)$$

Donde:

$$K = \frac{z \cdot p}{60 \cdot a} \quad (5)$$

Es una constante particular de cada máquina.

Reacción de armadura

Al circular por el inducido de la máquina una corriente de carga " I ", éste se comporta como un solenoide, generando un campo magnético " A ", llamado "Reacción de armadura" o "Reacción del inducido"

Estando ubicadas las escobillas sobre la "línea neutra", resulta que si la corriente del inducido actuara sola, es decir, suponiendo que el devanado del campo principal no estuviese excitado, produciría una acción magnética cuyo eje coincide con la "línea neutra", tal como muestra la Figura 21.

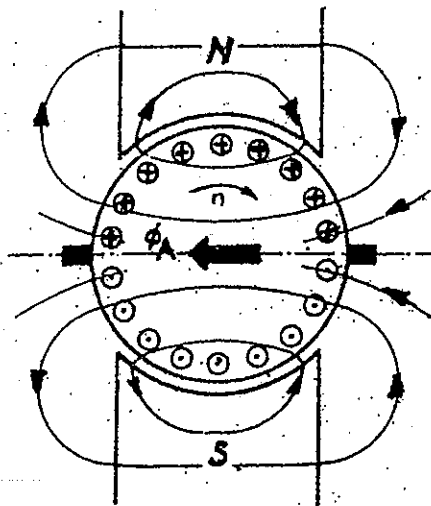


Fig. 21

Puede resumirse diciendo que el campo magnético del inducido (reacción de armadura) se encuentra en cuadratura con el eje del campo magnético principal generado por los arrollamientos inductores, es decir, está a 90° eléctricos de él, razón por la cual al campo del inducido se lo denomina "campo transversal".

Por lo tanto, la forma y disposición del campo magnético generado por los polos inductores se ve distorsionado cuando circulan corrientes en los devanados de la armadura, ya que éstos también están produciendo su propio campo magnético.

Estos dos campos magnéticos se combinan en forma vectorial dando como resultado un campo distorsionado. La Figura 22 muestra el campo magnético típico no distorsionado, generado por un polo principal de la máquina, cuando no circula corriente de carga en su inducido.

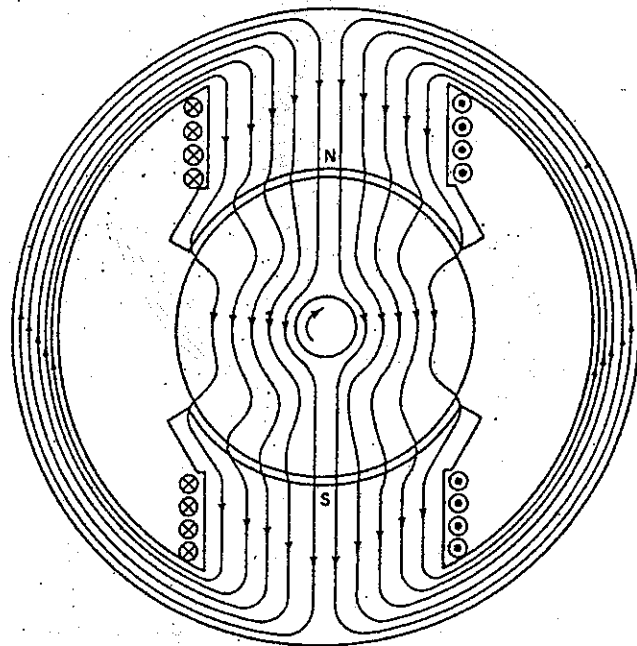


Fig. 22

La Figura 23 muestra el campo magnético generado por la "reacción de armadura", cuya acción es proporcional a la corriente del inducido.

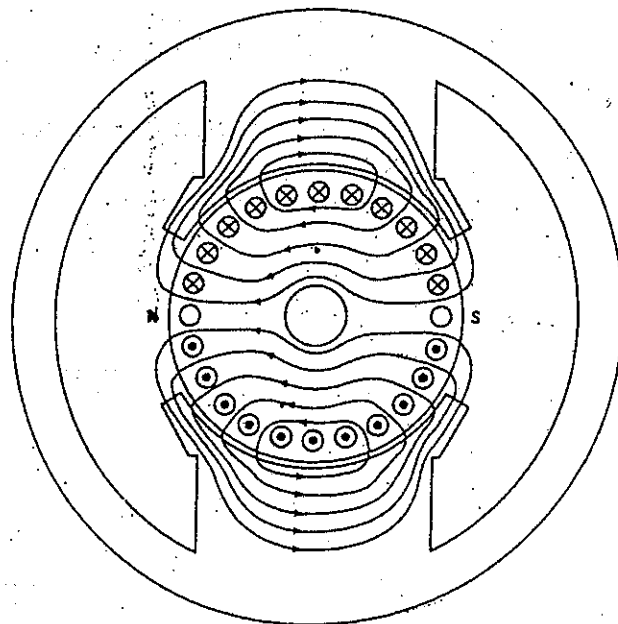


Fig. 23

Por último, la Figura 24 muestra el resultado de la combinación de la acción magnética de ambos campos cuando actúan simultáneamente, donde puede observarse la acción distorsionante de la "reacción de armadura" " A ".

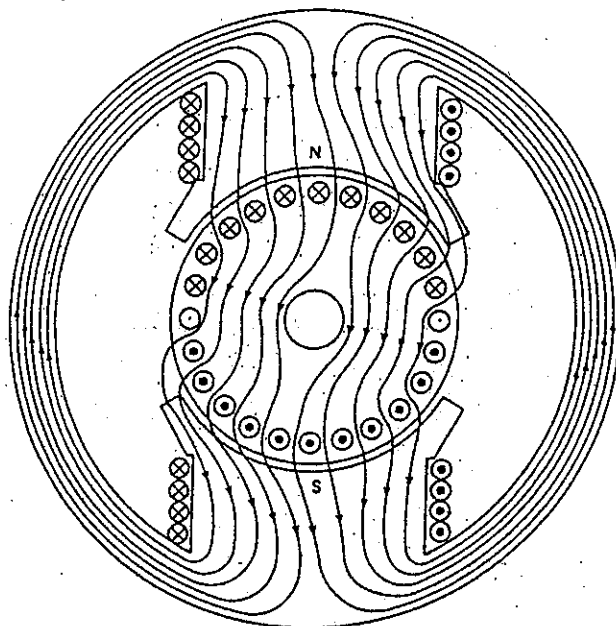


Fig. 24

Desarrollando la superficie de la armadura de una máquina bipolar y, suponiendo ahora, que el campo principal está excitado, sobre la máquina, como ya dijimos, actuarán dos campos magnéticos: El campo principal " F ", generado por los devanados inductores y la "reacción de armadura", generada por la acción magnética de la corriente de carga " I ".

Cuando la máquina funciona normalmente ambos campos magnéticos actúan simultáneamente, generando un campo resultante " R ", que es la suma vectorial de los campos " F " y " A "

Como puede observarse en la Figura 25, la "reacción de armadura" refuerzan la acción magnética en la mitad derecha del "polo principal" y la debilita en la mitad izquierda del mismo.

En la figura 25 también se observa que la "reacción de armadura" provoca un desplazamiento de la "línea neutra"; lo que obligaría a desplazar continuamente las escobillas, según varíe la corriente de carga hacia una nueva posición para que el proceso de conmutación se efectúe correctamente.

Por lo tanto, observando la acción resultante de la excitación del campo principal y de la reacción de armadura, se manifiestan dos efectos, a saber:

- 01) La "línea neutra" (n - n) (paso por cero) se ha desplazado de la línea interpolar a la nueva posición (n' - n'), lo que provoca un efecto de "distorsión" del campo magnético resultante, observándose que se refuerza el campo magnético en el sentido de la rotación en el generador y, en el sentido contrario al de rotación en el caso del motor.
- 02) El flujo magnético total por polo ha disminuido, lo que sumado al efecto de distorsión provoca una acción "desmagnetizante".

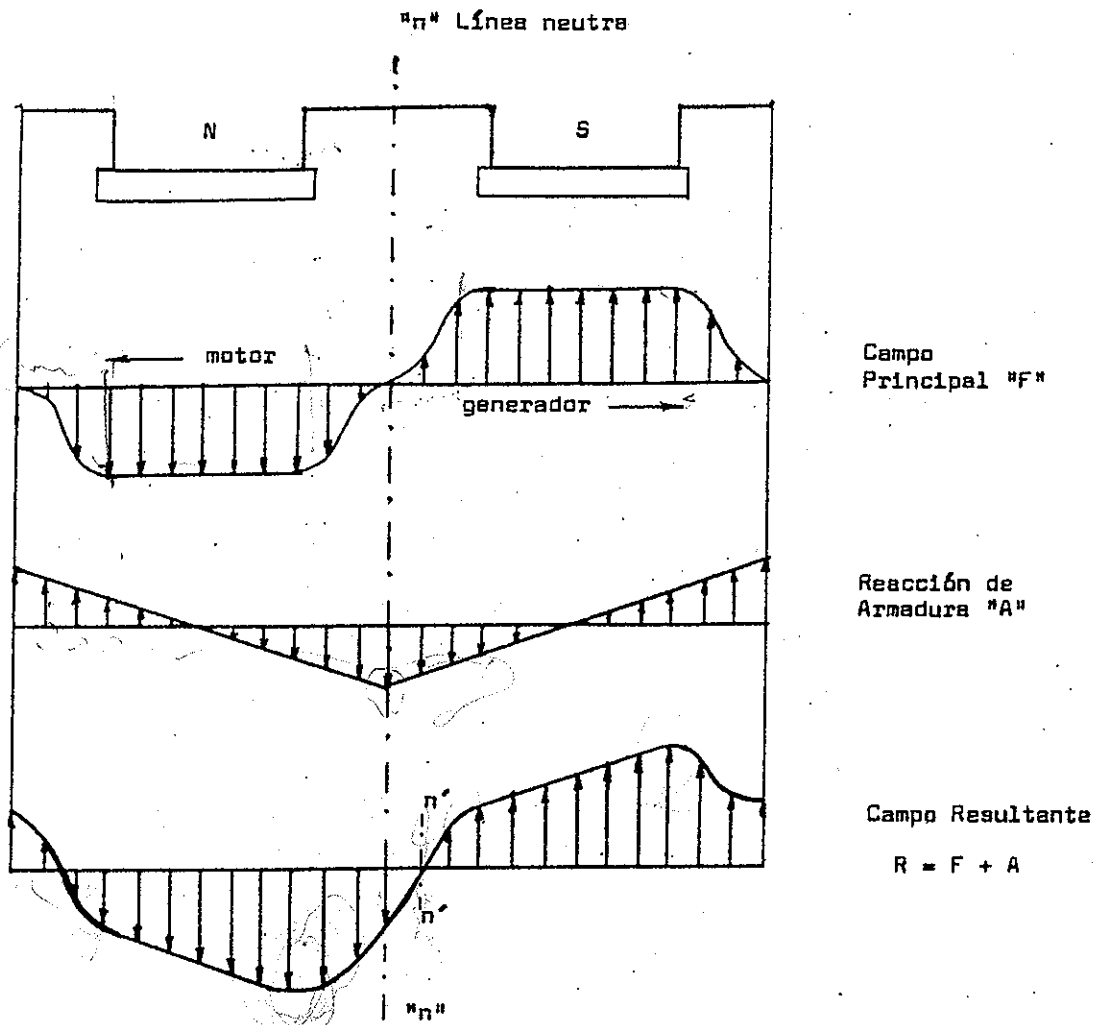


Fig. 25

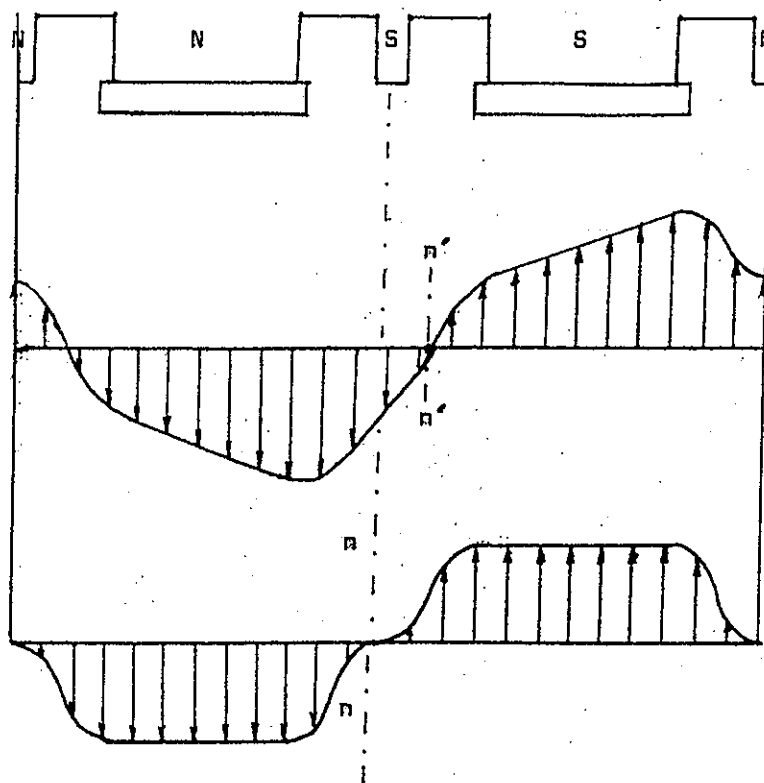
Como dijimos que la nueva posición de la "línea neutra" depende de la magnitud de la corriente de carga, lo que trae como inconveniente que habría que estar haciendo constantemente un cambio de posición de las escobillas cada vez que varía la carga de la máquina.

Para evitar este inconveniente se crearon los "polos de conmutación", o "interpolos", cuyos devanados están recorridos por la corriente de carga, de forma tal que compensan la acción magnética de la "reacción de armadura" y, de este modo, evitan el tener que estar variando continuamente la posición de las escobillas, las que ahora permanecen fijas en la posición de la "línea neutra" primitiva, como puede observarse en la Figura 26.

En las máquinas antiguas se situaban las escobillas adelantadas en el sentido de rotación para el funcionamiento de la máquina como generador y retrasadas en el caso que la máquina funcionase como motor, buscando empíricamente las condiciones de conmutación menos malas.

Los "polos auxiliares" actúan en la zona magnético de los interpolos y es necesaria su instalación en todas las máquinas que superen la potencia de 1 KW.

En máquinas de mayor potencia y sometidas a sobrecargas intensas la deformación del flujo magnético frente a las caras de los "polos principales" puede llegar a ser tan importantes como para producir diferencias de potencial anormales entre delgas próximas.

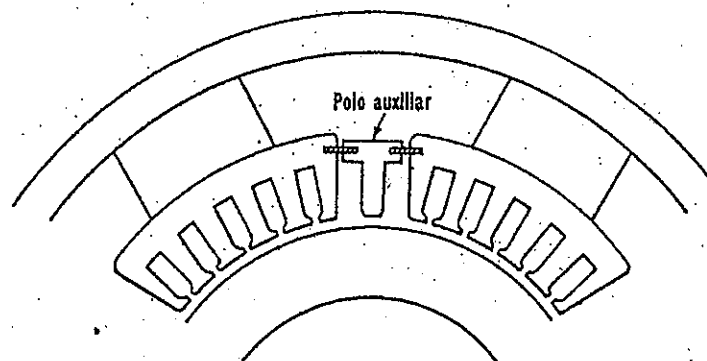
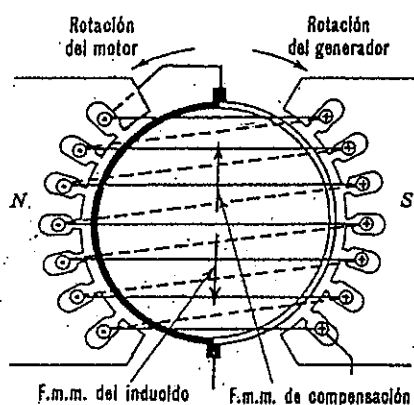


Campo resultante antes de colocar los "polos auxiliares"

Campo resultante de la máquina con "polos auxiliares"

Fig. 26

Para corregir este defecto se instalan en las expansiones polares de los "polos principales" un arrollamiento recorrido por la corriente del inducido y cuyo efecto magnético se opone al de la armadura en esa zona. Este nuevo devanado se denomina "arrollamiento de compensación", cuya disposición real, el montaje de los "polos auxiliares" y del "arrollamiento de compensación" se muestran en la Figura 27.



Pieza polar ranurada y polo auxiliar intercalado.

Fig. 27

GENERADOR CON EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

En este tipo de generador la corriente continua de excitación "i", proviene de una fuente ajena a la máquina, como otro generador de corriente continua, o un batería de acumuladores, en cuyo caso tendremos una máquina con "excitación independiente", o también denominada con "excitación separada".

La Figura 28 representa esquemáticamente esta máquina utilizando la simbología normalizada.

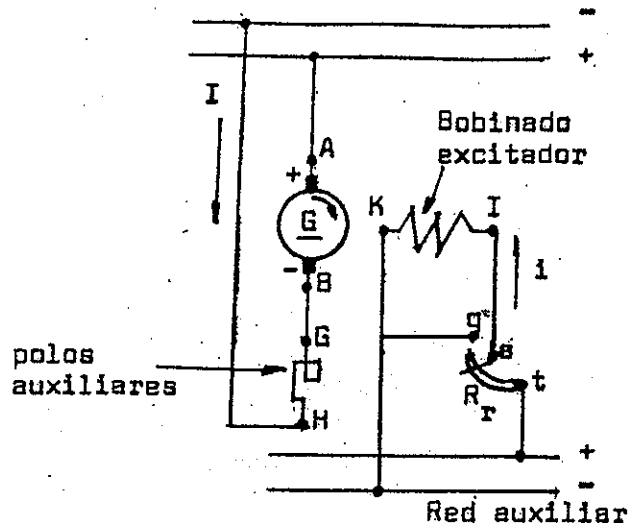


Fig. 28

El resistor de regulación "Rr", permite variar la corriente de excitación "i" y con ella el flujo inductor. El resistor de regulación posee un cursor que se indica con la letra S, un borne fijo "t", conectado al "positivo" de la red auxiliar y un punto muerto "q" que permite poner en cortocircuito al campo inductor cuando se lo desee.

Las letras "K - I" indican los bornes del bobinado de los "polos principales" con todas sus bobinas. Con las letras "A - B" se señala el circuito completo del inducido, que comprende: Bobinado del rotor, escobillas, conexiones, etc...

Por convención la letra "A" corresponde al polo positivo. Con las letras "G - H" se señala todo el circuito de mejora de la conmutación, comprendiendo: "polos auxiliares" y "arrollamientos compensadores".

Dentro del circuito representativo del inducido vemos la letra "G" que indica "generador" y bajo esta letra un trazo recto, que indica que el generador es de corriente continua. La flecha curva indica el sentido de giro de la máquina.

El sentido de giro en las máquinas provistas de "colector" se determina mirando a la máquina por el lado contrario al del colector, llamado "lado de accionamiento". Como sentido normal de marcha rige el de la derecha, es decir, en el sentido de giro de las agujas del reloj.

Características de funcionamiento

Las principales curvas características que interesa conocer en un generador de corriente continua, cualquiera sea su forma de excitación, son:

01) Característica de vacío	$E = f(i)$	$n = \text{cte.}$	$I = 0$
02) Característica en carga	$U = f(i)$	$n = \text{cte.}$	$I = I_n = \text{cte.}$
03) Característica exterior	$U = f(I)$	$n = \text{cte.}$	$i = i = \text{cte.}$
04) Característica de regulación	$i = f(I)$	$n = \text{cte.}$	$U = U_n = \text{cte.}$

Salvo en la primera de las características, en todas las restantes se hace sentir la "reacción de armadura", como así también, las "caídas internas" de la máquina.

En general, las caídas de tensión internas de la máquina son ocasionadas por dos resistencias:

- a) Las resistencias de las bobinas del inducido, conexiones, arrollamientos en serie (si los hay), polos auxiliares y devanados compensadores.
- b) Resistencias de contacto entre colector y escobillas (La caída de tensión por cada escobilla es de aproximadamente 1 voltio)

Característica de vacío

La "característica de vacío" es una curva que revela las cualidades del circuito magnético de la máquina. Representa la tensión en bornes de la máquina en función de la corriente de excitación, para velocidad angular constante y sin carga, es decir, $I = 0$.

Llevamos a la máquina a su velocidad angular nominal y comenzamos a excitarla, incrementando la corriente de excitación "i", sin que la máquina alimente carga alguna. En estas circunstancias la máquina inducirá en sus bornes una fuerza electromotriz "E", dada por:

$$E = \frac{z \cdot n}{a \cdot 60} p \phi = K \cdot n \cdot \phi \quad (4)$$

Como la velocidad de la máquina se mantiene constante, observamos que la fuerza electromotriz "E" será función del flujo magnético " ϕ ", o sea, de la corriente de excitación "i", la cual se puede variar por medio del reóstato R_r .

Para cada valor de "i" vamos a obtener un valor distinto de "E" y, por lo tanto, si graficamos dicha función, obtendremos la llamada "Característica de vacío" del generador, que representa, en realidad, la "curva de magnetización" de la máquina, que está representada en la Figura 29.

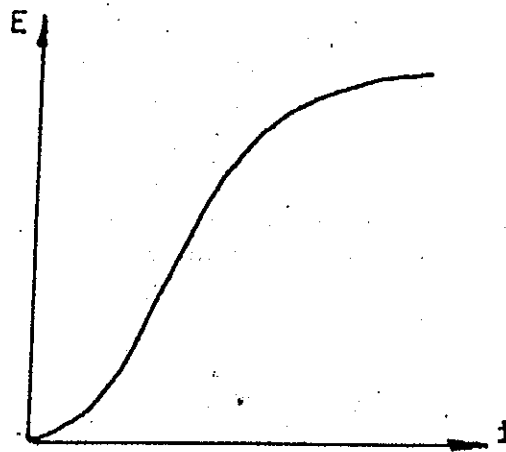


Fig. 29

Característica en carga

La "característica en carga" se obtiene para las mismas condiciones de la "característica de vacío", sólo que en aquella $I = 0$ y en esta $I = I_n$, siendo I_n la corriente nominal de la máquina. La Figura 30 gráfica la curva de la "característica en carga"

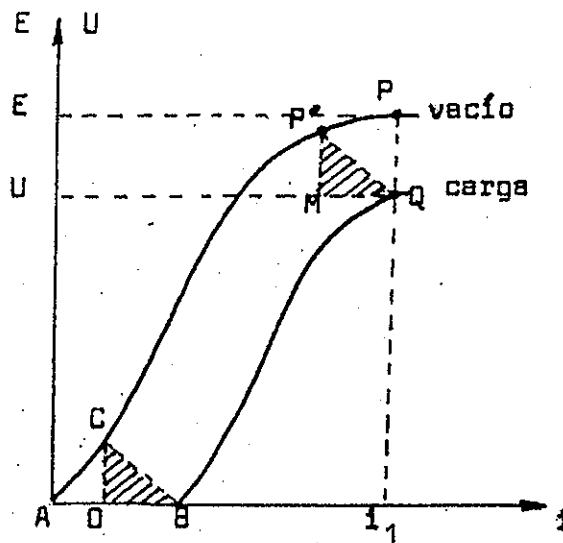


Fig. 30

Supongamos que excitamos la máquina con una corriente inductora " i_1 ". En esas condiciones el generador trabajaría sobre el punto P de la "característica de vacío", generando en sus bornes una fuerza electromotriz E

Al circular la corriente nominal I_n por el arrollamiento rotórico, se producirá una reacción de armadura que debilitará el campo de excitación y llevará a trabajar a la máquina del punto P al punto P'.

A su vez, la corriente I_n producirá en los arrollamientos rotóricos una cierta caída de tensión que vendrá dada por:

$$\Delta U = \sum I_n R_i + \Delta U_c \quad (7)$$

Donde $\sum I_n R_i$ representa las caídas de tensión ohmicas en las resistencias internas de la máquina y ΔU_c , las caídas de tensión en las escobillas. La caída de tensión total viene representada en el gráfico de la Figura 30 por el segmento $\overline{P'M}$.

El segmento \overline{MQ} representa la desmagnetización de la máquina provocada por la "reacción de armadura" y mide la fuerza magnetomotriz de dicha reacción, que es el valor utilizado para el cálculo de los "arrollamientos de compensación".

Como el valor de la corriente de excitación " i ", en el análisis de todo este proceso no ha variado, el punto " Q " es un punto de la "característica en carga" de la máquina.

Además, como la corriente de carga de la máquina se mantiene constante e igual a su valor nominal, los segmentos $\overline{P'M}$ y \overline{MQ} no varían, cualquiera sea el valor de la corriente de excitación.

Por lo tanto, la "característica en carga" estará representada por el lugar geométrico del punto " Q ", obtenido desplazando el triángulo $\overline{P'MQ}$, paralelo a sí mismo a lo largo de la "característica de vacío".

El segmento \overline{AO} representa la excitación necesaria para compensar las caídas internas de la máquina. ($\overline{CO} = \overline{P'M}$).

Característica exterior

Es la representación de la tensión en bornes de la máquina, en función de la corriente de carga, obtenida girando la máquina a su velocidad angular nominal y manteniendo constante la corriente de excitación en su valor nominal, tal como se gráfica en la Figura 31.

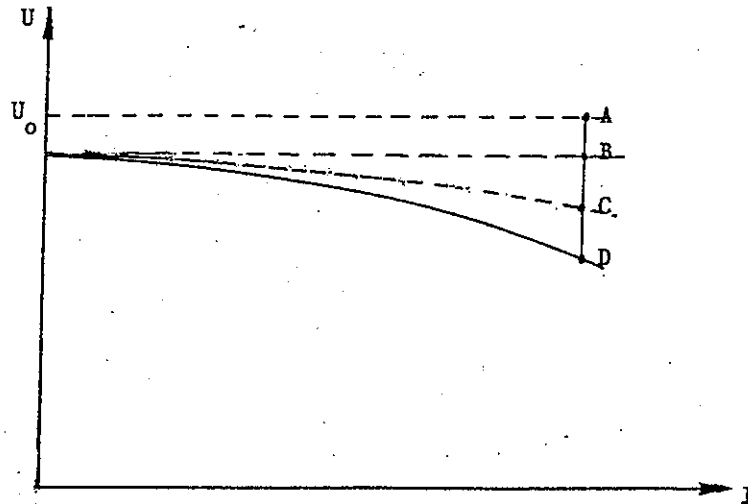


Fig. 31

Esta curva característica de la máquina viene representada por la recta U_0-A en condiciones ideales, lo que significa, que cualquiera sea el valor de la corriente de carga I , la tensión en bornes se mantiene constante.

No obstante, en la máquina real existe una caída de tensión en las escobillas de aproximadamente 1 Voltio por escobilla, que viene representada por el segmento \overline{AB} .

Además, debido a la "reacción de armadura" se produce una caída de tensión adicional representada por el segmento \overline{BC} . Existe aún otra caída de tensión debido a las resistencias internas de los devanados de la máquina, representada por el segmento \overline{CD} , por lo que la "característica externa" de la máquina, en definitiva, resulta ser la graficada en trazo continuo en la Figura 31.

Característica de regulación

La "característica de regulación" es la representación gráfica de la corriente de excitación " i " en función de la corriente de carga " I ", cuando la máquina gira a su velocidad nominal y manteniendo su tensión en bornes constante en su valor nominal.

A los efectos de mantener la tensión en bornes constante, como el aumentar la corriente de carga, aumentan también los efectos desmagnetizantes de la armadura, como así también las caídas en las resistencias internas, para contrarrestar dichos efectos nos vemos obligados a aumentar la corriente de excitación, lo que provocaría un aumento de la fuerza electromotriz E y, mantendría, de esta forma, la tensión de salida de la máquina constante en su valor nominal, tal como se muestra en la Figura 32.

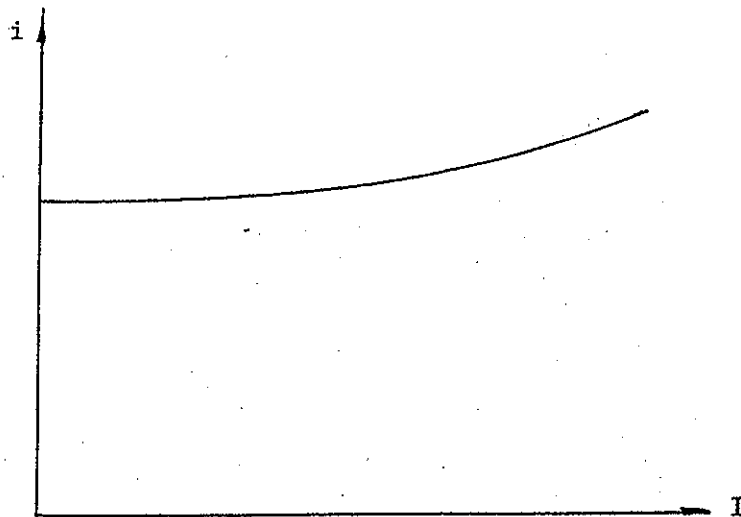


Fig. 32

GENERADOR DERIVACION - Proceso de autoexcitación

El "Generador derivación" se denomina así, porque como lo indica la Figura 33, el campo magnético de excitación está conectado en paralelo con el circuito de carga de la máquina.

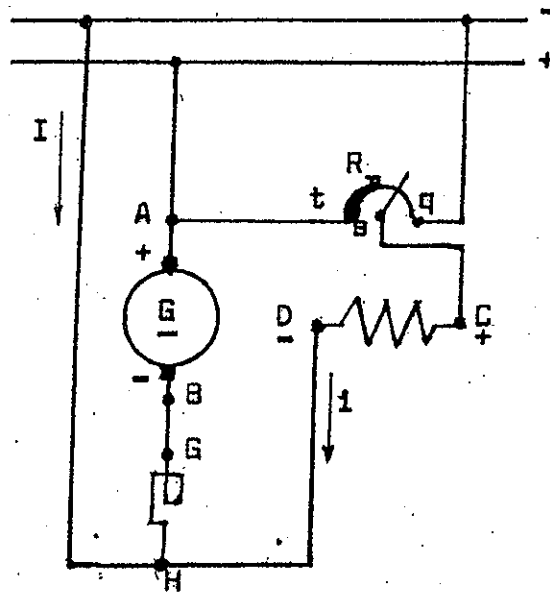


Fig. 33

Es factible obtener la corriente de excitación de la misma máquina, porque en los "polos principales" siempre es posible provocar un "magnetismo remanente", aplicando una corriente continua dada en el momento de instalar la máquina o, a veces, en la misma fábrica.

Al girar el inducido, el pequeño flujo generado por el "magnetismo remanente" que existe en los polos principales, genera una fuerza electromotriz en los conductores del inducido y aparece una pequeña tensión en los bornes de la máquina, que está en el orden del 1 al 5 por ciento de la tensión nominal del generador, como se muestra en la Figura 34.

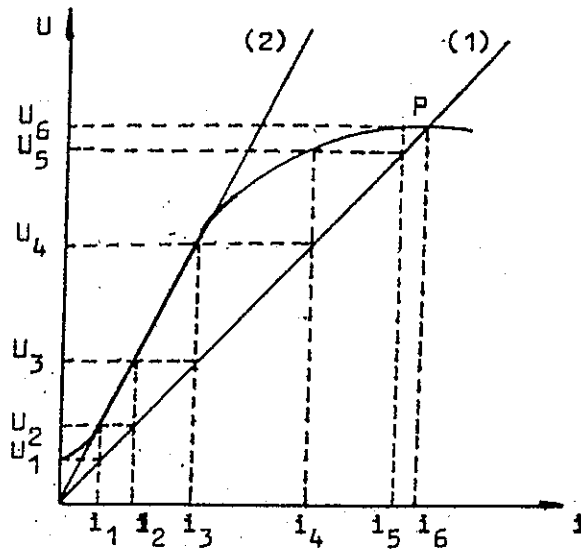


Fig. 34

Esta pequeña tensión U_1 puede aplicarse a las bobinas de excitación de los polos principales y, si la conexión es correcta, incrementará el flujo magnético apareciendo en los bornes de la máquina una tensión U_2 , que genera una corriente de excitación " i_2 ", repitiéndose este proceso hasta alcanzar un punto de equilibrio representado por el punto P en la Figura 34.

La pequeña tensión U_1 , generada por el "magnetismo remanente" hará circular por los bobinados de excitación una corriente i_1 , dada por:

$$i_1 = \frac{U_1}{R_e + R_r} \quad (6)$$

Al circular esta corriente por los bobinados inductores, incrementará la excitación, haciendo que la tensión en bornes de la máquina sea, ahora, U_2 . Esta tensión U_2 hará circular por los bobinados inductores una corriente de excitación i_2 , mayor que la anterior, dada por:

$$i_2 = \frac{U_2}{R_e + R_r} \quad (7)$$

Continuando este proceso se llegará a la corriente de excitación $i_6 = i_n$ en correspondencia con el punto de intersección de la recta (1) y la curva de excitación en vacío, punto P de la figura 34, existiendo ahora la tensión nominal $U_6 = U_n$ en los bornes del generador.

Como se observa, el punto de equilibrio y estabilización de la tensión de la máquina depende de la inclinación, o pendiente de la recta (1), dada, por:

$$\text{Tg } \alpha = R_e + R_r = \frac{U}{i} \quad (8)$$

Observando la figura 34, es evidente, que si se aumenta el valor del resistor R_r , aumentaría, también, el valor de la pendiente de la recta y llegaría un momento en que dicha recta se confundiría con la pendiente de la "curva de vacío" en su zona lineal.

En estas circunstancias la tensión de salida del generador se hace muy inestable, pues los puntos de equilibrio, o estabilización serían infinitos (todos los puntos comunes entre la recta y la zona lineal de la curva de vacío).

La recta (1) pasaría a ocupar la posición (2) en la figura 34 y a ese valor tan particular de la resistencia $R_e + R_r$, se le llama "Resistencia crítica", ya que un valor de esa resistencia superior a él haría que la máquina no podría excitarse, lográndose, en estas circunstancias una tensión en bornes del generador solamente algo superior a U_1 .

Característica de vacío

En los generadores con excitación en derivación, el generador nunca está totalmente en vacío, ya que entrega, al menos, la corriente de excitación "i", que es del orden del 1 al 10 por ciento del valor de la corriente de carga nominal, no constituyendo una carga digna de mención en los análisis de esta característica.

Por esta causa, la "característica de vacío" se puede trazar haciendo a la máquina "autoexcitada" y, el resultado será en un todo análogo al que se obtiene si se la excita en forma independiente, o con excitación separada.

Característica en carga

También en este caso la "característica en carga" será muy similar a la que se obtuvo para el generador con "excitación independiente", no obstante estudiaremos la curva con algún detalle analizando la Figura 35.

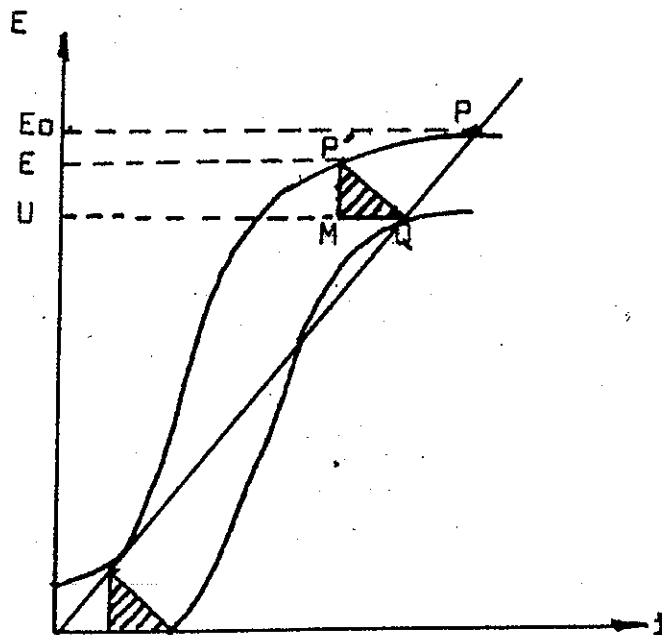


Fig. 35

En este ensayo por los arrollamientos rotóricos circulará una corriente $(I_n + i)$, por lo que la tensión en bornes de la máquina vendrá dada, por:

$$U = (E_0 - \Delta E) - (I_n + i) \sum R_i \quad (9)$$

Donde el primer paréntesis de la fórmula (9) expresa la variación de la fuerza electromotriz del valor E_0 al valor E , debido a la desmagnetización de la máquina provocada por la reacción del inducido y por la caída de tensión en bornes que produce una disminución en la corriente de excitación, ya que en este ensayo no es ella la que se mantiene constante, sino el valor ohmico del reóstato R_r .

Característica externa

Al principio esta curva disminuye más rápidamente que la homóloga del generador con "excitación independiente", debido que a las caídas de aquél debe sumársele, en este caso, el efecto de la disminución de la corriente de excitación provocada por la disminución de la tensión U . (Ver figura 36)

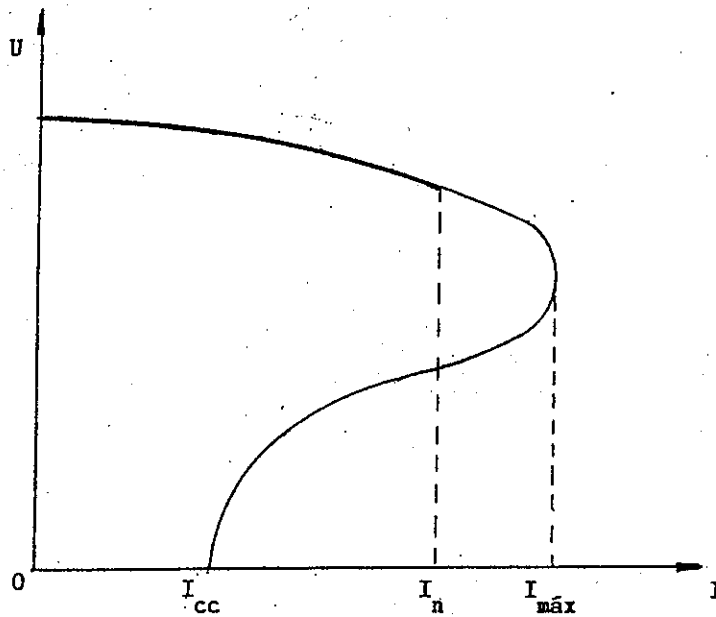


Fig. 36

Así se llega a un valor máximo de la corriente ($I_{máx}$) y a partir de ese punto la disminución de la tensión U , provoca una gran disminución de la corriente de excitación i y la fuerza electromotriz E se hace pequeña y como:

$$I = \frac{E - U}{\sum R_i} \quad (10)$$

Al disminuir el numerador, disminuye la corriente de carga I , hasta que al llegar al cortocircuito ($U = 0$), se cumple que:

$$I_{cc} = \frac{E_r}{\sum R_i} \quad (11)$$

Donde E_r es la fuerza electromotriz generada por el "magnetismo remanente".

Característica de regulación

La gráfica de la corriente de excitación " i " necesaria para mantener la tensión en bornes de la máquina constante cuando varía la corriente de carga " I ", presenta las mismas características que las de las máquinas con "excitación independiente", aunque la pendiente es algo mayor debido a que en estas máquinas debemos compensar una mayor caída de tensión, dado que a la corriente de carga debemos sumarle la propia corriente de excitación. No olvidemos que el generador debe generar la corriente $(I_n + i)$.

GENERADOR CON EXCITACIÓN SERIE

La Figura 37 ilustra el circuito básico de un generador de corriente continua con "excitación serie"

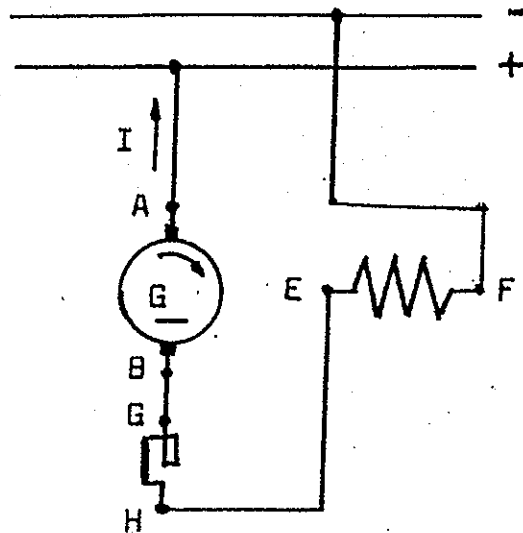


Fig. 37

El arrollamiento de campo E - F se conecta en serie con el inducido y, si el circuito exterior está cerrado, el "magnetismo remanente" ocasiona una pequeña corriente inductora que al circular por el arrollamiento del campo inductor, refuerza a dicho campo lográndose, así que la máquina se "autoexcite", del mismo modo que lo hacía en el caso del generador con excitación derivación.

Característica de vacío

Evidentemente, si la máquina está en vacío, es imposible trazar su curva de magnetización, debido a que la corriente de carga es la misma que la corriente de excitación y, al ser la corriente de carga nula, lo es también la corriente de excitación.

Por estas circunstancias, a los efectos de trazar la curva de magnetización de esta máquina, se la excita mediante una fuente de corriente continua externa, de igual modo que lo que se hacía con el generador con excitación independiente, por lo que la "característica de vacío", será muy similar a la de aquél.

Característica en carga

Como sabemos, la "característica en carga" es la representación gráfica de la tensión en bornes de la máquina en función de la corriente de excitación, manteniendo la corriente de carga en un valor constante, e igual a la corriente nominal.

Como en esta máquina la corriente de excitación es la misma que la corriente de carga, es imposible trazar esta curva característica.

Característica exterior

La "característica de vacío" y la "característica exterior" pueden trazarse en un mismo gráfico, como muestra la Figura 38, ya que para esta máquina se cumple que $i = I$.

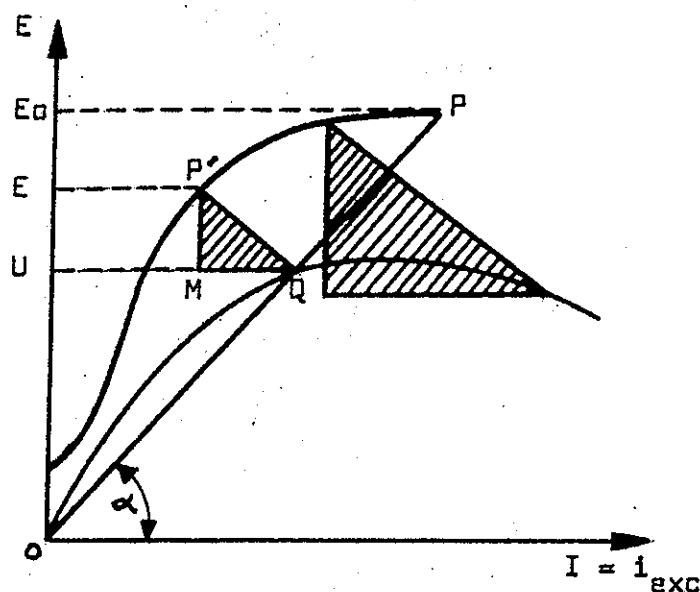


Fig. 38

La tensión en bornes de la máquina, será:

$$U = E_0 - \Delta E - I \sum R_i \quad (12)$$

La gran caída de tensión que se observa al aumentar la corriente de carga, se debe a que la reacción del inducido es proporcional a dicha corriente de carga, lo que provocará una desmagnetización de la máquina.

También el aumento de la carga provocará una mayor caída de tensión en las resistencias internas de los devanados. Analizando la fórmula 12, observamos que el aumento de la corriente de carga provoca un aumento de las caídas de tensión ΔE e $I \sum R_i$, lo que origina la gran caída de tensión que se observa en la figura 38.

Característica de regulación

En este tipo de máquina no se puede hablar de "regulación", ya que como sabemos, la corriente de excitación es la misma que la corriente de carga, por lo que es imposible trazar esta "curva característica".

GENERADORES COMPUESTOS (COMPOUND)

Si introducimos en un generador tipo derivación un devanado convenientemente conectado que proporcionara un flujo magnético que se suma al flujo inductor, podríamos compensar el efecto desmagnetizante de la "reacción de armadura" y con unos Amperios -vuelta más, podríamos compensar, también, las otras caídas de tensión de forma tal, que la "característica externa", resulte lo más constante posible.

Como estas caídas de tensión son proporcionales a la corriente de carga, el arrollamiento compensador deberá ser recorrido por la propia corriente de carga, es decir, que el generador con "excitación compuesta", lleva en cada polo dos bobinados. Uno de los cuales se conecta en derivación y el otro en serie, como se muestra en la Figura 39.

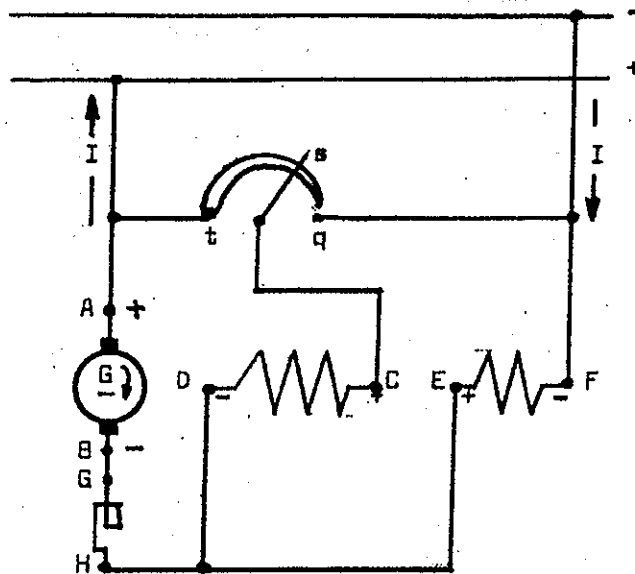


Fig. 39

Los devanados correspondientes al campo C-D, se diseñan de alta resistencia y muchas espiras de alambre fino y se conectan en "derivación". Los arrollamientos del campo E-F poseen pocas espiras de alambre grueso y se conectan en "serie" con la carga.

En la "excitación compuesta", si bien el eje magnético, geoméricamente hablando, de ambas bobinas es coincidente, puede ser que los "sentidos" de los flujos magnéticos generados, sean coincidentes, o de sentidos opuestos.

Si los flujos magnéticos generados por ambos arrollamientos suman sus efectos, la excitación se denomina "compuesta adicional". Si en cambio los flujos magnéticos son opuestos, la excitación recibe el nombre de "compuesta diferencial".

Esto, como es lógico, depende del sentido de ejecución de los bobinados y del sentido de las corrientes que se adopten.

Los generadores con excitación "compuesta adicional", son compensados total, o parcialmente, pues se combina la "característica externa" inclinada hacia abajo del generador derivación, con la "característica externa" inclinada hacia arriba del generador con excitación serie.

Los generadores con compensación "adicional" pueden ser "hipercompound", sobrecompensados, o "hipocompound", o subcompensados.

Los generadores "compuestos diferenciales", desde que la excitación "serie" se opone a la excitación "derivación", presentan una acusada caída de tensión y la intensidad de cortocircuito puede hacerse caer dentro de la zona de cargas admisibles y suelen ser usados en equipos de soldadura.

Comparación de curvas características

En la Figura 40 se trazaron las "características externas" de los distintos tipos de generadores, suponiendo que para plena carga todos tienen igual tensión en sus bornes.

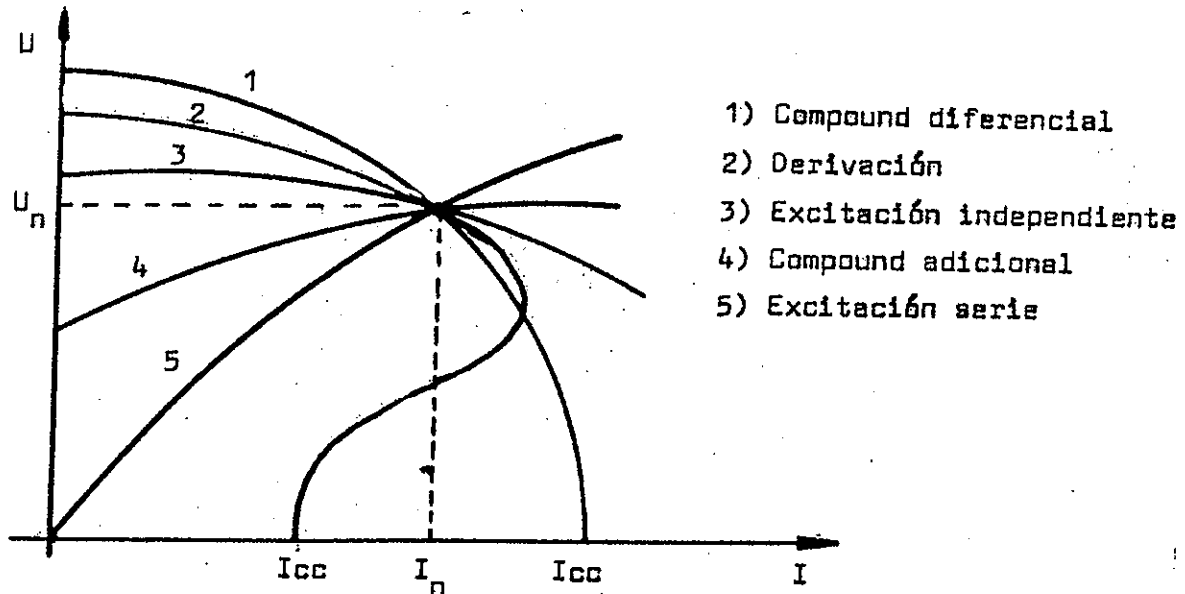


Fig. 40

Se observa que en un generador "compuesto adicional", bien dimensionado, la tensión puede mantenerse prácticamente constante con la variación de la carga.

El generador con "excitación independiente" posee menor caída de tensión que la correspondiente al generador con "excitación derivación", pero tiene el inconveniente de necesitar una fuente de tensión separada.

En el generador con "excitación serie" la tensión crece con la carga, mientras que en el generador con "excitación compuesta diferencial", la tensión cae fuertemente con la carga, los que los hace muy aptos en la construcción de equipos de soldadura.

MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

La máquina de corriente continua es reversible, pudiendo funcionar indistintamente como generador, o como motor.

En cuanto a la faz constructiva, tanto el generador como el motor, no presentan diferencia alguna entre sí.

Es importante hacer notar, que conservando constante la polaridad y el sentido de rotación, el sentido de circulación de la corriente del inducido es opuesto tratándose de un motor, o de un generador.

Ecuaciones fundamentales

Cuando un motor se encuentra en movimiento, sus conductores rotóricos giran y existe una variación de flujo magnético abrazado por las espiras que ellos constituyen lo que genera una fuerza electromotriz inducida, que en el caso de los motores se denomina "fuerza contraelectromotriz", ya que en este caso, la tensión de alimentación es equilibrada por dicha

fuerza contraelectromotriz y por las caídas de tensión internas en las resistencias de sus devanados.

Entonces, podemos escribir:

$$U = E + I R_i \quad (13)$$

Donde U es la tensión de alimentación del motor E , la fuerza contraelectromotriz inducida e $I \cdot R_i$ representa las caídas de tensión en todas las resistencias internas de la máquina.

La fuerza contraelectromotriz E , viene dada por:

$$E = \frac{z \cdot n}{a \cdot 60} p \phi = K \cdot n \cdot \phi \quad (4)$$

Reemplazando la (4) en la (13), estamos en condiciones de escribir la ecuación general de las máquinas de corriente continua:

$$U = K \cdot n \cdot \phi \pm I R_i \quad (14)$$

En la (14) se usa el signo "positivo" (+) para los motores y el signo "negativo" (-) para los generadores.

Multiplicando ambos miembros de la (14) por la corriente de carga I , obtenemos:

$$U \cdot I = E \cdot I \pm I^2 R_i \quad (15)$$

$U \cdot I$ = Potencia eléctrica entregada al motor en sus bornes

$I^2 \cdot R_i$ = Potencia disipada en el inducido en forma de calor

$E \cdot I$ = Potencia mecánica de la armadura

La potencia mecánica puede escribirse:

$$P_m = E \cdot I = \omega \cdot C \quad (16)$$

P_m (Watt)

ω (seg^{-1})

C (Joule)

Si expresamos la velocidad angular ω en r.p.m. y considerando que 1 Krm = 9,81 Joule, podemos escribir:

$$P_m = \frac{2 \cdot n \cdot \pi}{60} \cdot 9,81 \cdot C = 1,027 \cdot C \cdot n \quad (17)$$

P_m (Watt)

n (r.p.m.)

C (Kgm)

Despejando la cupla C de la (17), obtenemos:

$$C = 0,975 \frac{P_m}{n} \quad (18)$$

De la fórmula (16) podemos deducir, que:

$$C = \frac{60.P.m}{2.\pi.n} = \frac{60.E.I}{2.\pi.n} = \frac{60.Z.n.p.\phi.I}{2.\pi.n.60.a}$$

$$C = \frac{Z.p.\phi.I}{2.\pi.a} = K_1.\phi.I \quad (19)$$

En la fórmula (19) se observa que la cupla depende del flujo magnético y de la corriente de carga y es independiente de la velocidad angular del motor.

El ajuste de los valores del flujo magnético y de la corriente para una determinada carga mecánica en el árbol del motor es una operación que se regula en forma automática en la máquina.

Los motores de corriente continua pueden excitarse de la misma forma que los generadores, aclarando que la "excitación independiente" se confunde, prácticamente, con la "excitación derivación" y, además, la "excitación compuesta diferencial" no se emplea porque produce condiciones inestables de marcha.

En resumen, en la práctica se encuentran motores de corriente continua con excitación derivación, serie y compuesta adicional.

Con cualquiera de los tres tipos de excitación arriba mencionados, se emplea un reóstato para la puesta en marcha, el que cumple la función de limitar la corriente en el momento del arranque, dado que la corriente de arranque es siempre muy elevada, en razón que para ese estado la fuerza contraelectromotriz es nula, dado que la velocidad también es nula, desde el momento que el motor está detenido.

En efecto, de la (14) podemos deducir:

$$I = \frac{U - K.n.\phi}{R_i} \quad (20)$$

Y como cuando el motor arranca, resulta que $n = 0$, nos queda:

$$I_{\text{arranque}} = \frac{U}{R_i} \quad (21)$$

Como el valor de las resistencias internas R_i es pequeño, la corriente de arranque resulta elevada, pero una vez que la máquina arrancó y va aumentando su velocidad, se incrementa el valor de la fuerza contraelectromotriz y la corriente va disminuyendo.

Para limitar la corriente de arranque se utiliza un reóstato en serie con el inducido, cuya resistencia óhmica se suma a la del mismo y entonces el valor de la corriente de puesta en marcha, se reduce a:

$$I_{\text{arranque}} = \frac{U}{R_i + R_A} \quad (22)$$

Siendo R_A la resistencia del reóstato de arranque. Una vez en marcha se puede ir desintercalando el reóstato de arranque del circuito, hasta que alcanzada la velocidad angular impuesta por la carga mecánica quede totalmente excluido del mismo.

Dicha resistencia debe excluirse inevitablemente del circuito, porque en muy raras ocasiones se diseña para servicio continuado.

Curvas características de los motores de corriente continua

Como lo que interesa siempre en un motor es el comportamiento del mismo frente a la carga mecánica demandada en su árbol, que es la variable independiente, o sea, la potencia mecánica entregada: $P_m = 1,027 \cdot n \cdot C$, interesa saber cómo varían los dos componentes de esta potencia en función de la intensidad de corriente absorbida de la red por el motor.

Las dos "curvas características" principales a estudiar son la "característica de velocidad", $n = f(I)$ y la "característica de cupla", $C = f(I)$, manteniendo, en ambos casos, el resto de las variables constantes.

Además, interesa de sobremanera una tercera curva característica denominada "característica mecánica", $n = f(C)$, que resulta ser una consecuencia de las dos anteriores.

MOTOR CON EXCITACIÓN DERIVACION

En la Figura 41 se muestra el circuito de un motor con "excitación derivación". El reóstato de arranque R_A está conectado en serie con el inducido en su tramo L-R (el cursor se coloca en M para el arranque) y así puede cumplirse la fórmula (22)

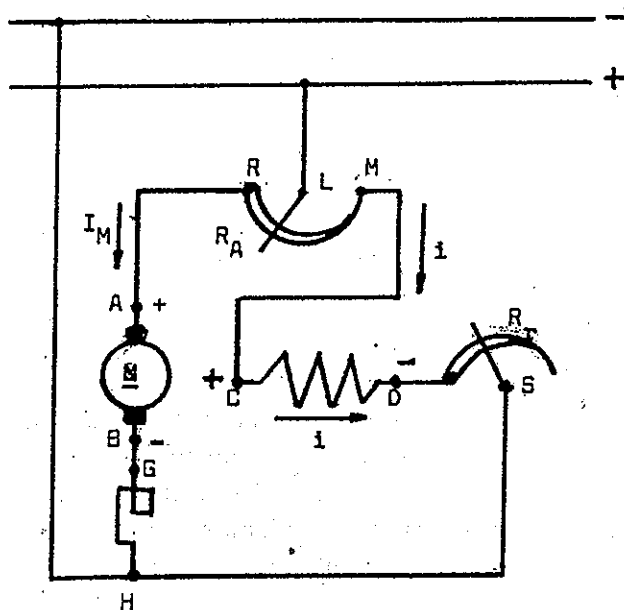


Fig. 41

El reóstato R_A se va excluyendo a medida que la máquina va tomando velocidad, hasta que el cursor llega al punto R. Obsérvese que por la forma de conexión, al iniciarse el arranque R_A no está en serie con el devanado de campo y se va incluyendo en serie con él a medida que la máquina toma velocidad, ya que el tramo L-M está en serie con el devanado excitador.

Esto tiene muy poca importancia en lo que respecta a la velocidad, porque R_A es muy pequeña, comparada con la resistencia del campo de excitación, pero es una ventaja, porque en esa forma al desconectar la máquina de la red la energía acumulada en el campo electromagnético del circuito excitador se descarga sobre el circuito de la armadura y el reóstato R_A .

Característica de velocidad $n = f(I)$

De la fórmula (14) se desprende, que:

$$n = \frac{U - I.R_i}{K.\phi} \quad (23)$$

En la que observamos que si la tensión se mantiene constante, el numerador de la (23) disminuye muy poco con el aumento de la corriente, justamente en la cantidad $I.R_i$ y el denominador se mantiene, también, prácticamente constante, ya que en este tipo de máquina el flujo magnético del campo inductor sólo depende de la tensión.

Al aumentar la corriente I , por aumento de la cupla demandada en el árbol del motor, la velocidad disminuye muy poco, debido al aumento de la caída de tensión $I.R_i$, por lo que la velocidad debería disminuir linealmente con el aumento de la carga, pero en realidad no es así, pues cuando I aumenta, aumenta también la reacción del inducido, por lo que el flujo magnético útil disminuye, tendiendo, debido a esta circunstancia, a aumentar algo la velocidad, tal como se observa en la Figura 42.

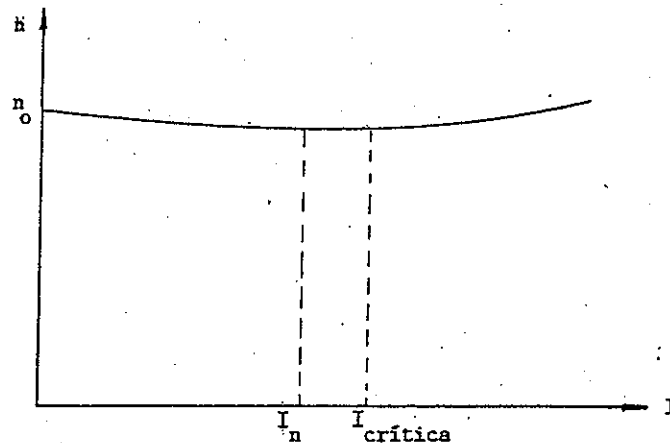


Fig. 42

El efecto de la reacción del inducido llega a predominar sobre el de la caída rotórica, por lo que la velocidad luego de pasar por un valor mínimo, a cuya intensidad correspondiente se la denomina "corriente crítica", comienza a aumentar nuevamente.

En general, la intensidad de corriente nominal I_n es un valor muy inferior al de la intensidad crítica, por lo que a los efectos prácticos podemos decir que la velocidad del motor en función de la corriente se mantiene prácticamente constante variando linealmente con una pendiente levemente negativa.

Analizando la fórmula 23 puede inferirse que si la tensión de alimentación del motor es constante, la velocidad varía en forma inversamente proporcional al flujo magnético principal. Esta circunstancia hace que en los motores "no debe cortarse nunca la corriente de excitación", porque de hacerlo, se anula el flujo magnético y la velocidad se incrementaría enormemente, deteriorándose el inducido si las protecciones no actúan a tiempo para poder protegerlo.

Característica de cupla $C = f(I)$

Si analizamos la fórmula 19, podemos deducir como varía la cupla en función de la corriente de carga del motor:

$$C = K_1 \cdot \phi \cdot I$$

(19)

En esta máquina sabemos que el flujo magnético inductor ϕ se mantiene prácticamente constante, mientras que la tensión de alimentación del motor U también permanezca constante, de forma tal que la cupla varía prácticamente en forma lineal con la intensidad de corriente I , tal como lo muestra la Figura 43.

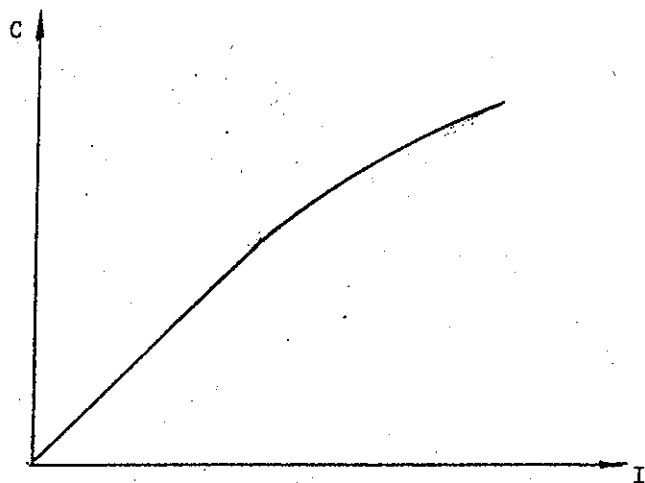


Fig. 43

Sin embargo, cuando la intensidad de corriente es elevada, lo afirmado precedentemente no se cumple exactamente debido al efecto desmagnetizante de la reacción del inducido que debilita al campo magnético inductor, lo que provoca una disminución de la cupla, por lo que la curva adopta la forma mostrada en la figura 43.

Característica mecánica $n = f(C)$

La "característica mecánica" puede obtenerse analizando las dos curvas características anteriores, tomando los pares de valores correspondientes para cada valor de la corriente de carga I .

Previamente despejaremos de la fórmula 19 el valor de la corriente I , que nos resultará de utilidad en el análisis matemático de la "característica mecánica".

$$I = \frac{C}{K_1 \cdot \phi}$$

(24)

Partiendo de la fórmula (23) y reemplazando en ella la fórmula (24), obtenemos:

$$n = \frac{U - I R_i}{K \cdot \phi} = \frac{U}{K \cdot \phi} - \frac{I R_i}{K \cdot \phi} = \frac{U}{K \cdot \phi} - \frac{C R_i}{K \cdot K_1 \cdot \phi^2} = n_0 - K_2 \cdot C$$

(25)

La representación gráfica de la fórmula (25) es una recta de pendiente negativa, como lo muestra la Figura 44.

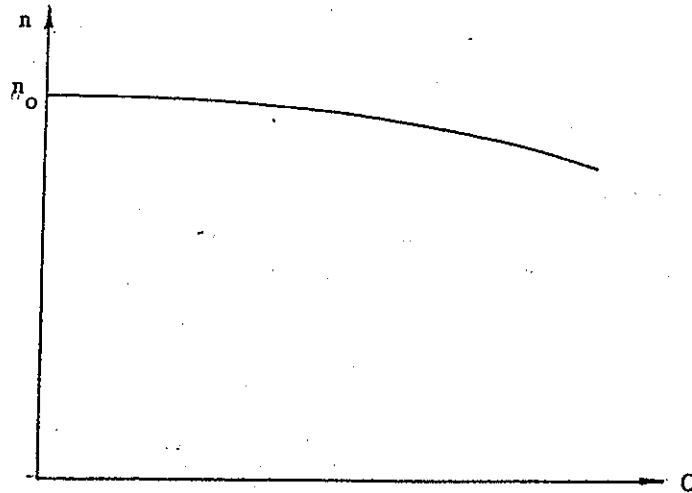


Fig. 44

Sin embargo, para valores de cuplas elevadas la velocidad cae más que proporcionalmente debido a la reacción del inducido que tiende a desmagnetizar al campo inductor del motor y la curva característica se curva ligeramente hacia abajo, tornándose algo cóncava hacia el eje de las cuplas.

Por lo tanto, podemos afirmar que: "La velocidad de un motor de corriente continua con excitación derivación es prácticamente independiente de la cupla resistente aplicada a su árbol, por lo que estos motores pueden considerarse de velocidad prácticamente constante"

MOTOR CON EXCITACIÓN SERIE

El circuito básico de un motor de corriente continua con excitación serie es el mostrado en la Figura 45.

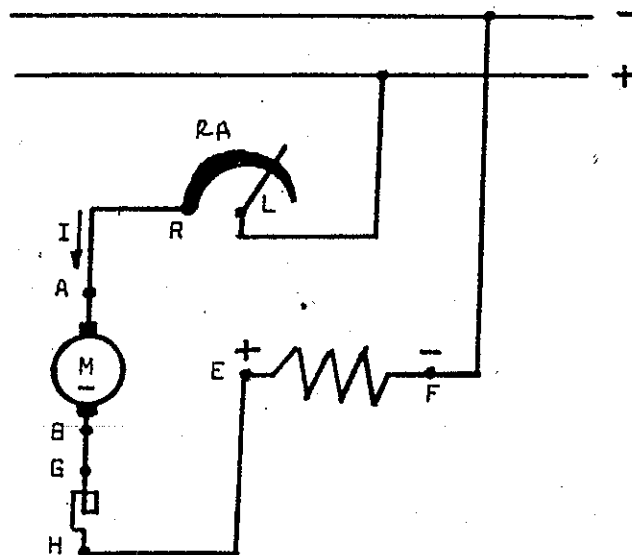


Fig. 45

Como se observa en la figura anterior los motores con excitación serie necesitan también un resistor de arranque R_A para la puesta en marcha y, como es obvio el campo inductor es recorrido por la corriente de carga I , o sea, por la corriente del inducido.

Característica de cupla $C = f(I)$

Analizando la fórmula genérica de la cupla y reemplazando en ella la fórmula 26, nos queda:

$$C = K_1 \cdot \phi \cdot I = K_1 \cdot K_3 \cdot I = K_4 \cdot I^2 \quad (28)$$

La fórmula 28 nos indica que la cupla varía en forma cuadrática con la carga, es decir la curva adopta la forma de una parábola de segundo grado, pero debido a que la corriente de carga produce una reacción de inducido que desmagnetiza a la máquina disminuyendo el flujo inductor, la cupla aumenta menos rápidamente, es decir, que la intensidad de corriente I necesaria para obtener una determinada cupla, resulta mayor que la teórica, tal como muestra la Figura 47.

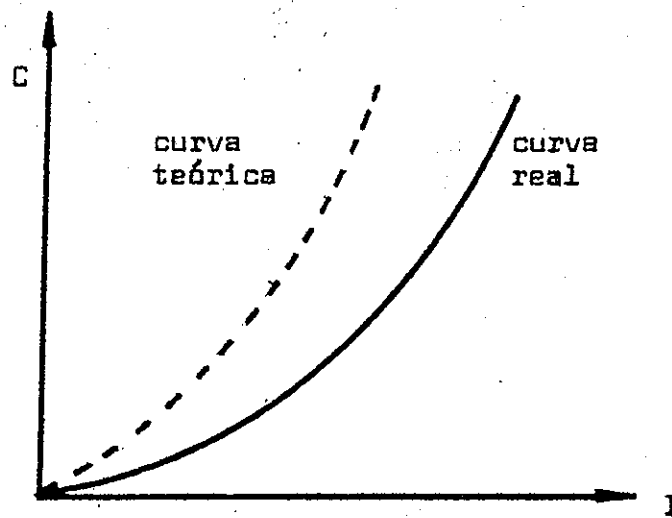


Fig. 47

Característica mecánica $n = f(C)$

El estudio simultáneo de las curvas características $n = f(I)$ y $C = f(I)$, nos permite obtener la curva de la "característica mecánica".

En efecto, de la fórmula 28 podemos despejar el valor de la corriente I y reemplazar dicho valor en la expresión genérica de la velocidad:

$$I = \sqrt{\frac{C}{K_4}} = K_5 \cdot \sqrt{C} \quad (29)$$

$$n = \frac{U - I R_i}{K \cdot \phi} = \frac{U}{K \cdot K_3 \cdot I} - \frac{R_i}{K \cdot K_3} = \frac{U}{K \cdot K_3 \cdot K_5 \cdot \sqrt{C}} - \frac{R_i}{K \cdot K_3} \quad (30)$$

Analizando la fórmula 30, observamos que la gráfica de la variación de la velocidad en función de la cupla adopta una forma hiperbólica, tal como lo muestra la figura 48

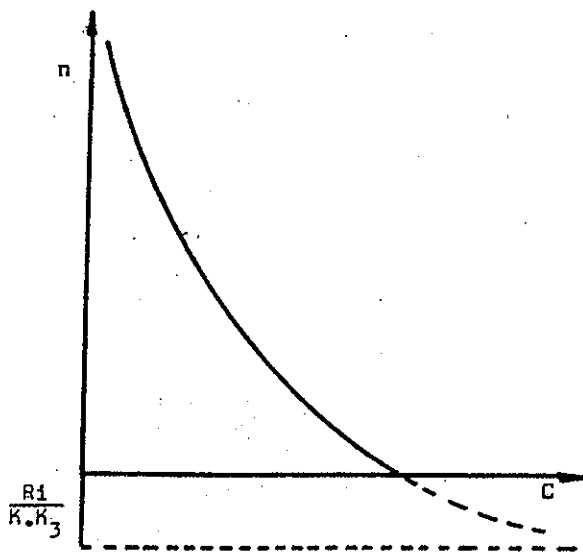


Fig. 48

Cuando la potencia mecánica demandada $P = 1,027 n.C$ es constante, también lo será el producto $n.C$ en todos los regímenes de funcionamiento del motor. Ello nos dice que cuando se demanda al motor un gran esfuerzo, él disminuye su velocidad y, cuando el esfuerzo demandado es débil, la máquina se acelera.

Analizando la Figura 48 observamos que el grado de estabilidad del motor serie (constancia de la cupla), es menor que la del motor con excitación derivación.

MOTOR CON EXCITACIÓN COMPUESTA ADICIONAL

Dado que este tipo de motor es una combinación de los dos anteriores, se comprende que sus curvas características presenten un aspecto intermedio entre las curvas características de ellos y, tanto más se acercarán a uno u otro, cuanto más predomine magnéticamente hablando, el arrollamiento respectivo, tal como puede observarse en la Figura 49.

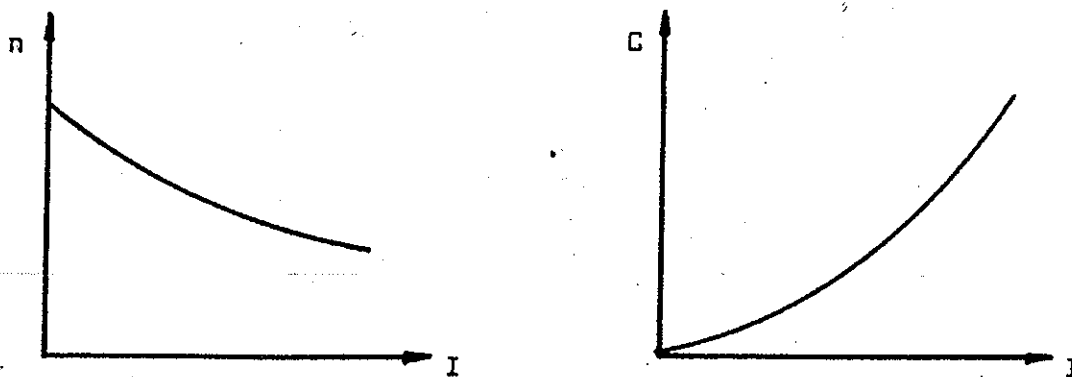


Fig. 49

Dado que la componente del campo serie actúa en el mismo sentido que el campo inductor principal, el flujo total debe aumentar con la carga, por lo que la "característica de velocidad" debe tener una fuerte pendiente negativa, mientras que la curva "característica de cupla", tendrá una concavidad hacia arriba intermedia entre las características de los motores derivación y serie.

MOTOR CON EXCITACIÓN COMPUESTA DIFERENCIAL

En este caso que el flujo magnético generado por el arrollamiento "serie" se resta al flujo magnético principal, con lo que el flujo inductor disminuye con el aumento de la carga. Puede obtenerse una compensación de la disminución de la velocidad debido al aumento de la caída de tensión rotórica $I \cdot R_i$ con la carga y mantener la velocidad prácticamente constante y, aún hacer que ella aumente con la carga. (Ver Figura 50)

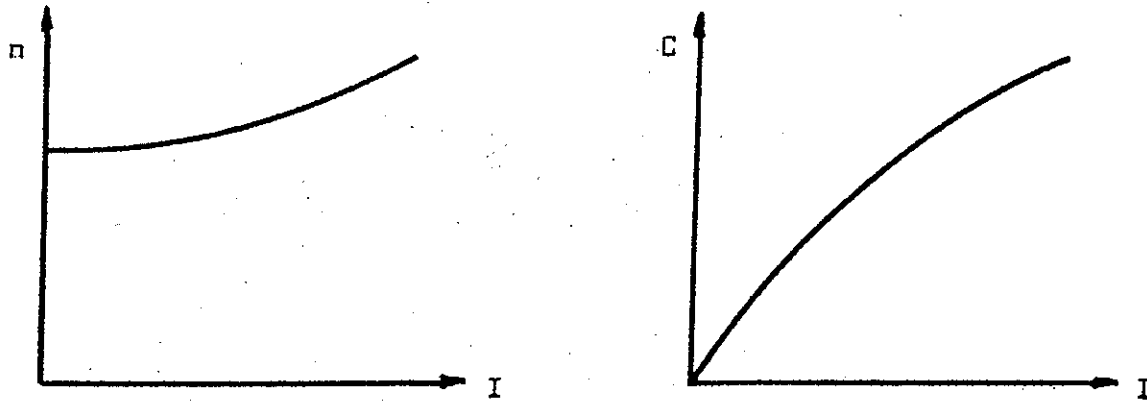


Fig. 50

Comparación de curvas características

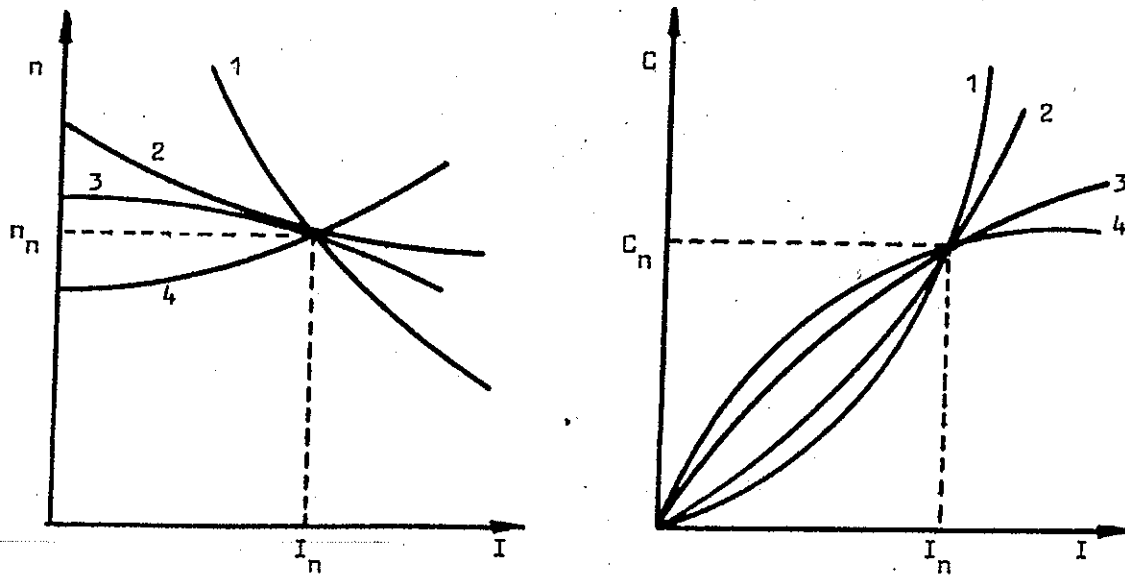


Fig.51

- 1 - Motor con excitación serie
- 2 - Motor con excitación compuesta adicional
- 3 - Motor con excitación derivación
- 4 - Motor con excitación compuesta diferencial

Uso de los motores de corriente continua

En la elección de un tipo de motor tienen importancia tres factores, a saber:

- 1) **Velocidad:** Que puede ser constante, variable, o regulable
- 2) **Cupla de arranque:** Que puede ser mayor, o menor que la cupla de plena carga
- 3) **Corriente de arranque:** Que puede ocasionar perturbaciones en la red.

Los tipos de motores de corriente continua disponibles, son:

Motor derivación

Su velocidad es aproximadamente constante con la variación de la carga y desarrolla una cupla proporcional a la corriente absorbida de la red. Los motores derivación se usan para tornos, perforadoras y otras máquinas herramientas de velocidad constante y también para comandos de dispositivos cuya cupla de arranque no sea demasiado enérgica, ventiladores, bombas centrífugas, etc...

Motor serie

Su velocidad es ampliamente variable con la carga y su cupla es proporcional al cuadrado de la corriente absorbida a la red, si el motor funciona magnéticamente no saturado. Los motores serie se emplean en tracción eléctrica, grúas, ascensores, montacargas, cuyas cuplas de arranque son elevadas y no requieren velocidad constante.

Cuando aumenta la carga de un motor serie, éste responde disminuyendo su velocidad y aumentando su cupla con un pequeño incremento de la intensidad de corriente, evitando así, súbitas perturbaciones en la red de alimentación.

En las mismas condiciones, un motor derivación mantendría constante su velocidad y desarrollaría la cupla exigida por la carga, pero a expensas de un gran aumento de la corriente absorbida, lo que ocasionaría perturbaciones severas en la red de alimentación.

Los motores serie no deben utilizarse para impulsar correas de transmisión, ni otros dispositivos en los que la carga pueda ser retirada, porque cuando ésta es baja, o nula, tienden a funcionar a velocidades excesivas.

Motor compuesto

Posee una velocidad variable con la carga y una "característica de cupla" comprendida entre la del motor derivación y la del motor serie. Este motor tiene, sobre el serie, la ventaja de acercarse a una velocidad límite para cargas débiles, velocidad que está dada por su campo derivación.

Los motores compuestos se emplean cuando no se requiere velocidad constante y donde se exige una cupla de arranque bastante elevada, excepto los casos en que se imponga el motor serie porque la cupla aludida así lo exija.

Se utilizan en ascensores rápidos, dado que su arrollamiento serie permite desarrollar una gran cupla de arranque, siendo desconectado luego de alcanzar cierta velocidad prefijada y el motor queda entonces funcionando a velocidad constante como si se tratara de un motor derivación.

Para funcionamiento de cortadoras, punzonadoras, etc..., cuya carga máxima sólo dura un corto tiempo, se recurre a la utilización del motor compuesto provisto de un volante, dado que la característica de velocidad decreciente permite que el volante entregue la energía mecánica acumulada con el fin de soportar el pico de carga y aliviar así al sistema de alimentación eléctrico. En el motor derivación, la velocidad no disminuye y, por lo tanto, el

volante no prestaría ninguna utilidad y el motor serie no sería adecuado, porque funcionaría a velocidades excesivas antes y después del corte.

Cuando se trata de trenes de laminación, cuya carga fluctúa muy rápidamente, se recurre al motor compuesto provisto de volante. A menudo se instalan motores compuestos donde resultaría más adecuada una característica de velocidad constante, propia del motor derivación, pero, sin embargo, el arrollamiento serie permite desarrollar la enérgica cupla necesaria para vencer la inercia de las partes rotantes, como acontece en las pesadas cepilladoras.

REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD

Estudiaremos, aquí, la "regulación de la velocidad" de los motores de corriente continua por medios eléctricos, pero aclarando, que hoy existen métodos electrónicos que poseen indudables ventajas sobre los medios eléctricos para tal fin.

Por otra parte, es conveniente antes de encarar el tema, hacer algunas precisiones genéricas, que resultarán de suma utilidad:

- 01) "La velocidad angular n de un motor de corriente continua es proporcional a la fuerza contraelectromotriz E inducida en la armadura, e inversamente proporcional al flujo magnético del campo inductor de la máquina"

$$n = \frac{E}{K \cdot \phi} = \frac{U - I \cdot R_i}{K \cdot \phi} \quad (23)$$

- 02) "La cupla C es proporcional al flujo magnético del campo inductor ϕ y a la corriente de armadura I ".

$$C = K_1 \cdot \phi \cdot I \quad (19)$$

- 03) "La potencia mecánica es proporcional a la velocidad angular n y a la cupla C del motor"

$$P_m = 1,027 \cdot C \cdot n = K_2 \cdot (U \cdot I - I^2 \cdot R_i) \quad (17)$$

- 04) "El flujo magnético inductor ϕ es proporcional a la corriente de excitación del campo inductor i "

$$\phi = K_3 \cdot i \quad (31)$$

La "regulación de la velocidad" de los motores de corriente continua puede obtenerse de las siguientes maneras, analizando la fórmula 23:

- Puede disminuirse la velocidad, reduciendo la tensión del inducido, con lo que la potencia disminuye proporcionalmente (ver fórmula 17), aunque la cupla permanece constante.
- Puede aumentarse la velocidad, reduciendo la corriente de excitación del campo inductor, con lo que disminuye la cupla (ver fórmula 19), aunque la potencia permanece constante.

Estas dos distintas formas de regular la velocidad son graficadas en la Figura 52

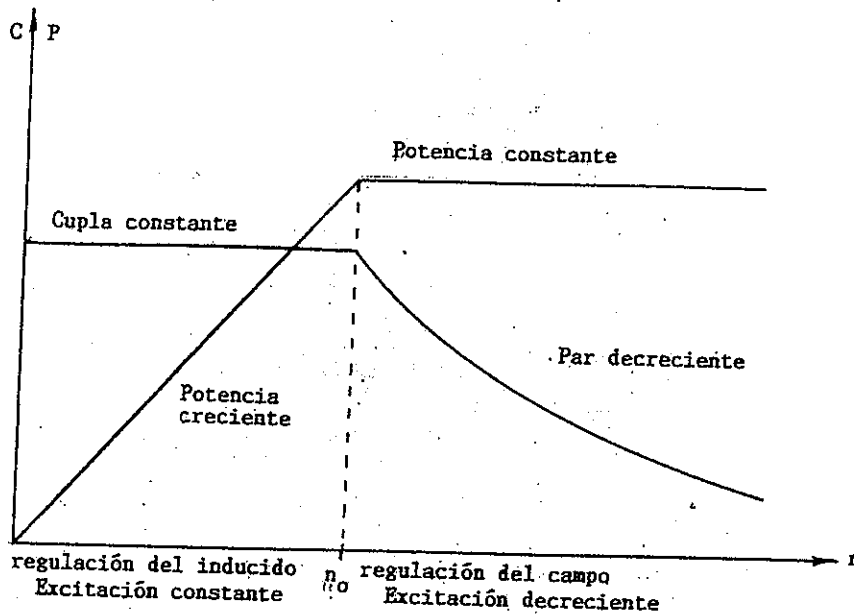


Fig. 52

Analizando la fórmula 23, se observa que la velocidad puede variarse de tres modos distintos, si las otras magnitudes permanecen constantes:

- 01) Control reostático: Variando R_i , conectando un resistor en serie con el inducido.
- 02) Control de campo: Variando el flujo inductor ϕ , actuando sobre la corriente de excitación " i "
- 03) Control de tensión: Variando la tensión de alimentación " U ".

Regulación de velocidad de motores serie

El método más sencillo de regular la velocidad de los motores "serie" consiste en variar la tensión de armadura añadiendo resistores en serie con el inducido.

Como el control de velocidad es un fenómeno permanente, la "resistencia de arranque" no es apta para tal fin, pues su capacidad para disipar energía es muy limitada y deberían conectarse "resistencias de arranque" ampliamente dimensionadas.

De aquí, que este tipo de control resulta antieconómico en funcionamiento y en costo de instalación, salvo para motores de pequeña potencia y de uso no industrial. Además, presenta dos serios inconvenientes técnicos:

- 01) La variación de velocidad es sólo en sentido decreciente
- 02) La velocidad no es estable si la corriente de carga varía.

La velocidad de los motores "serie" puede regularse, también, por medio de resistores en derivación con el inducido, o en derivación con el campo.

La figura 53 muestra el circuito de un motor "serie" al que se le conecta un resistor en derivación con el inducido.

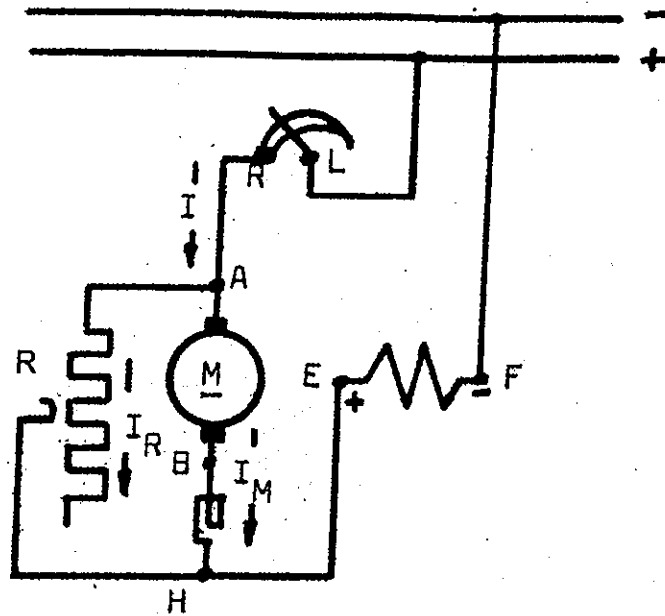


Fig. 53

Si la resistencia de regulación es de bajo valor óhmico, resulta que $I_R > I_M$, por lo que el motor estará muy excitado y, sin embargo, la corriente del inducido es pequeña, por lo que la velocidad del motor es baja y la cupla se conserva en su valor normal. Se desprende de que aumentando el valor óhmico de R, aumenta la velocidad.

En la Figura 54, el resistor variable R está conectado en derivación con el campo inductor y, entonces, ocurre lo contrario que en el caso anterior, ya que al disminuir el valor óhmico de R, aumenta la corriente I_R , disminuyendo la corriente I_S y, por lo tanto, aumenta la velocidad.

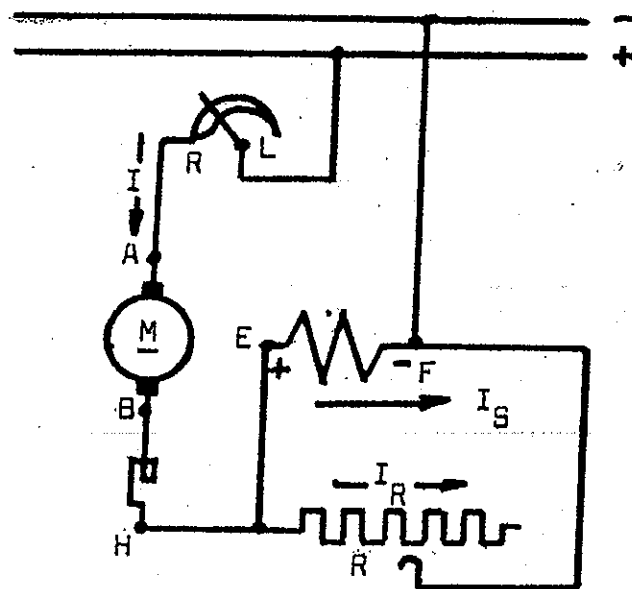


Fig. 54

El motor "serie" resulta particularmente apropiado para el servicio de tracción, porque es capaz de desarrollar mayor "cupla de arranque" que cualquier otro tipo de motor eléctrico,

porque su curva "característica mecánica" con una curva de velocidad de variación hiperbólica, limita automáticamente la demanda de energía en momentos de mucha carga, mientras que un motor "derivación", que funciona a velocidad prácticamente constante, con todas clases de cargas, tomaría de la red, una corriente excesiva, en tales circunstancias.

Control de velocidad "Serie-Paralelo"

Quando se trata de servicios de tracción en ferrocarriles urbanos, o interurbanos, cada coche-motor va equipado normalmente con cuatro motores "serie" de los cuales dos, permanentemente en paralelo y acoplados mecánicamente mediante una transmisión a las ruedas motrices delanteras, son equivalentes a un solo motor y, análogamente ocurre lo mismo con los otros dos motores que impulsan las ruedas traseras.

En la Figura 55 M_1 y M_2 son dos motores idénticos provistos de iguales resistores de arranque R_1 y R_2 , respectivamente.

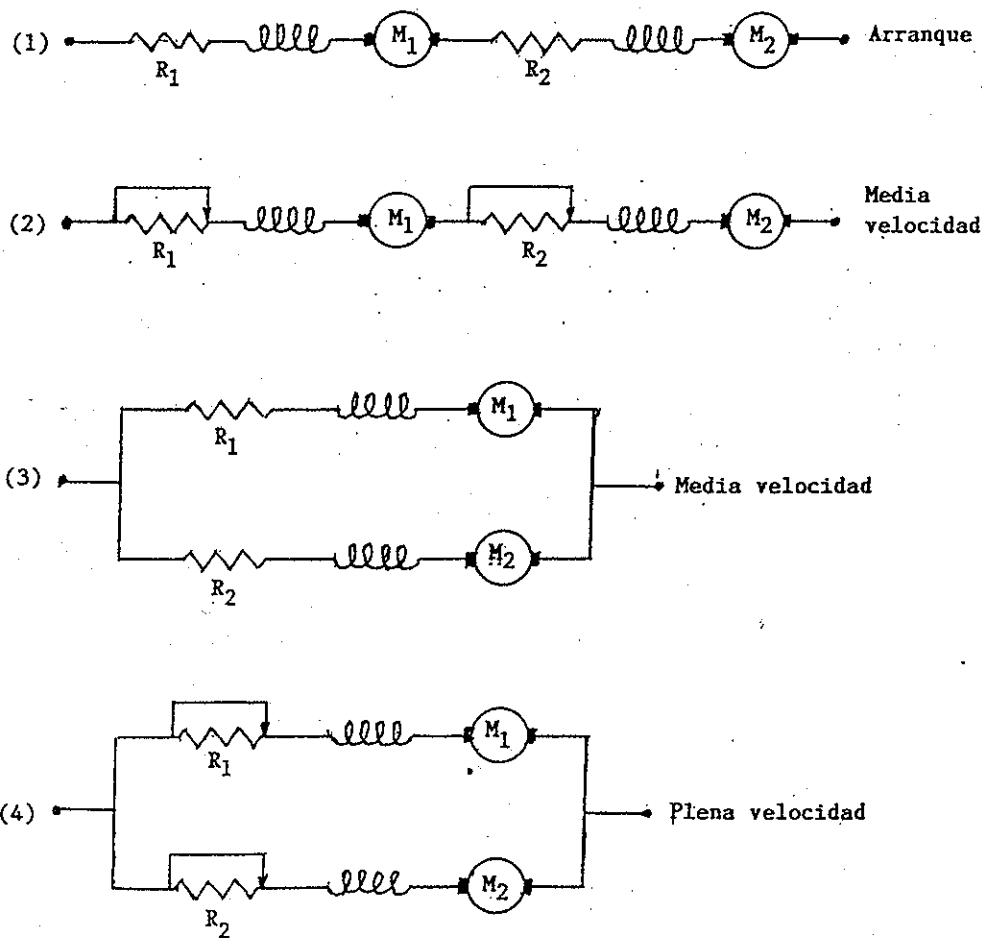


Fig. 55

En la posición (1) la tensión total de la línea es absorbida por los resistores de arranque R_1 y R_2 y los inducidos de los motores M_1 y M_2 , lo que provoca un arranque suave. Debe tenerse en cuenta, que en primera instancia, la casi totalidad de la tensión de la línea, cae en los resistores R_1 y R_2 , ya que en el momento del arranque las fuerzas electromotrices de ambos inducidos es nula.

En la posición (2) se van variando las resistencias R_1 y R_2 eliminándolas, poco a poco, por medio de un "combinador de tambor" hasta cortocircuitarlas, hasta que la tensión sobre los bornes de cada motor es la mitad de la tensión de línea.

La corriente y la cupla fluctúan, pero en condiciones normales de funcionamiento, sus valores medios permanecerán substancialmente constantes durante el período de aceleración y, por lo tanto, la velocidad aumentará en proporción casi uniforme hasta la mitad del valor correspondiente a cada motor, por lo que el tren marchará a media velocidad.

En la posición (3) una maniobra del "combinador" cambia la conexión "serie" de los motores a la conexión "paralelo" y al mismo tiempo, inserta entre ellos y la línea nuevamente los resistores de arranque R_1 y R_2 , tal que la corriente de cada motor y por lo tanto, la cupla, permanecen inalterados.

La corriente absorbida por cada motor, es la misma que la que tomaban de la línea en la posición (2), pero la corriente total tomada de la línea es el doble, mientras que la velocidad es la misma que en la posición (2), es decir, el tren marcha a media velocidad.

En la posición (4), los resistores R_1 y R_2 se van eliminando, poco a poco, hasta cortocircuitarlos, por lo que los motores giran a plena velocidad y están sometidos a la tensión total de línea entre sus bornes de alimentación.

Utilizando este procedimiento la pérdida de energía en los resistores de control es exactamente la mitad de la que se produciría si los motores hubiesen sido conectados en paralelo desde el principio de la operación.

La corriente absorbida por éstos se mantiene constante, de modo que también es constante la aceleración del tren.

Si se requieren velocidades superiores a la de plena carga habrá que conectar resistores en paralelo con los campos inductores "serie" de los motores.

Cuando el motor serie debe arrancar muy lentamente se conectan en paralelo con los inducidos de cada motor un resistor que tiene por objeto reducir la cupla de arranque

Si se pretende detener bruscamente al tren, se desconectan los motores de la línea y se intercala un resistor entre sus bornes terminales, en cuyo caso, el motor se comporta como un generador de corriente continua y se frena rápidamente. (frenado dinámico), mientras que la potencia desarrollada en dichos resistores se disipa en forma de calor.

Otra forma modificada del "frenado dinámico" es el denominado "frenado regenerativo", en el que la energía almacenada en el sistema móvil se devuelve a la línea de alimentación eléctrica en vez de consumirse pasivamente en un resistor.

Por ejemplo, mientras un sistema móvil, tal como un tren eléctrico bajando una pendiente se frena de esta forma, podría suministrar energía a otro tren que se hallase subiendo una rampa, aliviando así a la línea de alimentación de parte de la carga del sistema.

Regulación de velocidad de los motores derivación

Variación de la resistencia del inducido

En los motores con excitación derivación puede regularse la velocidad disponiendo un reóstato en serie con el inducido, pero esta regulación no resulta económica, puesto que las pérdidas en el resistor insertado son muy grandes, lo mismo que ocurría en los motores con excitación serie, pero tiene la virtud de poder así lograr bajas velocidades.

En efecto, en el caso de los motores con excitación derivación, o excitación independiente, el valor del flujo del devanado inductor se mantiene en un valor fijo, dado que la tensión de alimentación se mantiene en un valor constante.

Analizando la fórmula 23:

$$n = \frac{U - I \cdot R_i}{K \cdot \phi} \quad (23)$$

vemos que la velocidad depende de la diferencia $(U - I \cdot R_i)$ y, como el valor óhmico de R_i es muy bajo, obtenemos una posibilidad de variación de la velocidad, modificando el valor del numerador de la fórmula 23, agregando en serie con el inducido un reóstato R_r , el cual tendrá que disipar en forma de calor la potencia $I^2 \cdot R_r$, lo que hace al sistema antieconómico

La Figura 56 muestra el circuito del método de regulación de velocidad descrito, como así también se ilustran las curvas de variación de la velocidad en función de la corriente de carga I y tomando como parámetro el valor de la tensión aplicada al inducido.

La variación de la velocidad se produce sólo en el sentido decreciente.

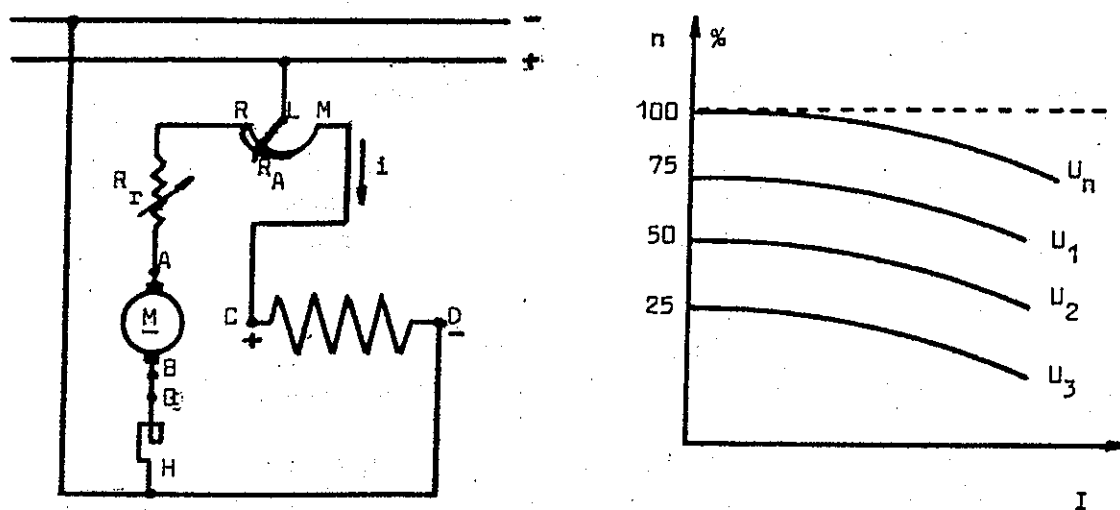


Fig. 56

Control por variación de la resistencia del campo inductor

Este método se adapta principalmente a los motores con excitación derivación y es el método más simple y económico, pues requiere solamente un reóstato en el circuito del devanado del campo inductor de la máquina.

La energía disipada en forma de calor es relativamente pequeña comparada con el método anterior, dado que la corriente de excitación del campo "i" es mucho menor que la corriente del inducido "I".

Para un motor cuyo arrollamiento de campo esté calculado para ser conectado a la tensión plena nominal U_n , el método provee solamente una variación en el sentido del aumento de velocidad, pues se actúa debilitando al flujo magnético del campo inductor.

La razón de la variación de velocidad que se puede obtener de esta forma con motores dotados de "interpolos", puede llegar hasta 6 a 1, correspondiendo la mínima velocidad a la condición de máxima excitación. Pero, si no existen "interpolos", la razón de la variación de velocidad queda limitada a aproximadamente 2 a 1.

El reóstato R_r regula el valor de la corriente de excitación del campo inductor y, por lo tanto, el valor del flujo excitador, con lo que se logra la variación de velocidad.

Aumentando el valor óhmico del resistor R_r se baja el valor de la corriente de excitación "i" y, por lo tanto se aumenta la velocidad. La Figura 57 ilustra sobre el circuito y las curvas características de la regulación de la velocidad.

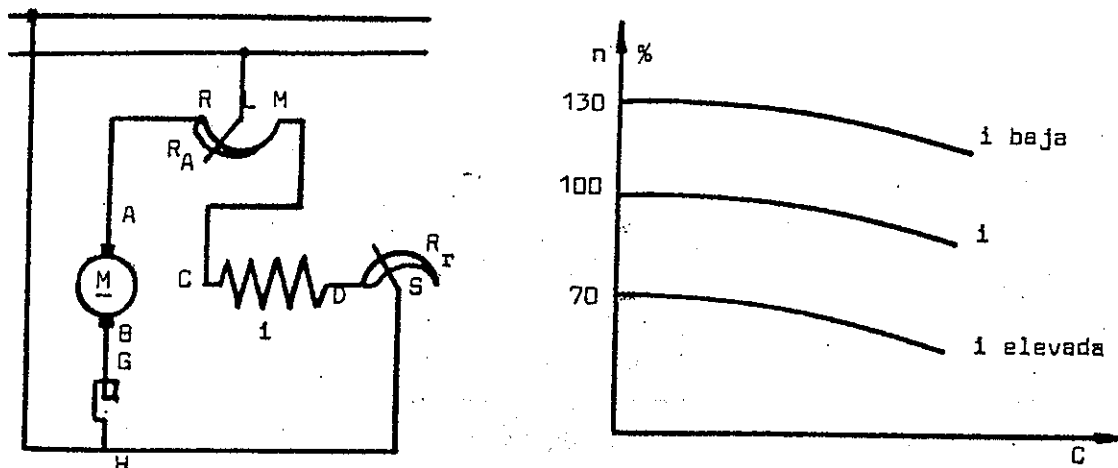


Fig. 57

Naturalmente existen ciertos límites para el aumento de la velocidad. Estos límites son unos de índole mecánica y otros de índole eléctrica, ya que una elevada velocidad origina peligrosas fuerzas centrífugas y además, un debilitamiento del campo inductor hace que el motor tome mayor corriente en el inducido para mantener el valor de la cupla, por lo que debe evitarse que este valor de corriente no comprometa y alcance el límite térmico del aislante del devanado del inducido.

Por otra parte, elevadas velocidades suelen producir dificultades en el proceso de conmutación que pueden manifestarse con un excesivo chisporroteo en las escobillas, por lo que estos motores van siempre provistos de "polos de conmutación", para minimizar este efecto.

Para alcanzar velocidades menores que la nominal se deberá incrementar la corriente excitadora " i " y se debe tener presente que podría comprometerse térmicamente el aislante del devanado excitador.

Estas dos técnicas de regulación de la velocidad de los motores de corriente continua con excitación derivación son, en realidad, complementarias.

El control de la "tensión de inducido" funciona bien para velocidades inferiores a la nominal, pero no para velocidades por encima de ella, ya que para alcanzar una velocidad mayor que la nominal mediante el control de tensión del inducido, se requeriría una tensión en el inducido que podría dañar la aislación de los devanados.

El método de "variación de la resistencia del campo inductor", o control de la corriente del campo magnético inductor, funciona bien para variación de la velocidad para velocidades por encima de la nominal.

Combinando las dos técnicas de control en el mismo motor, es posible obtener un rango de variación de velocidad de hasta 40 a 1, lo que nos dice que los motores con excitación en derivación, o separada, tienen excelentes características de control de velocidad.

Método de control de tensión

La velocidad de los motores de corriente continua de excitación separada, de excitación derivación, o de excitación compuesta se puede variar de tres distintas maneras, a saber : Variando la resistencia del inducido, variando la resistencia del campo inductor, o variando la tensión del inducido. De estos tres métodos, el más eficaz es de "control de la tensión del inducido", que permite amplias variaciones de la velocidad, sin afectar el par

máximo del motor. De hecho, la forma normal para variar la tensión del inducido de un motor de corriente continua, es la de proveerlo de su propio generador independiente.

Uno de los métodos más conocidos que aplican este tipo de control es el conocido con el nombre de "Ward-Leonard", que fue diseñado para instalaciones que requerían gran potencia y un amplio margen de variación de la velocidad.

La Figura 58 muestra el circuito eléctrico de este sistema de control, donde el motor de velocidad constante suele ser un motor de corriente alterada que sirve de máquina primaria a los dos generadores de corriente continua identificados como "excitador de potencial constante" y "generador de tensión ajustable".

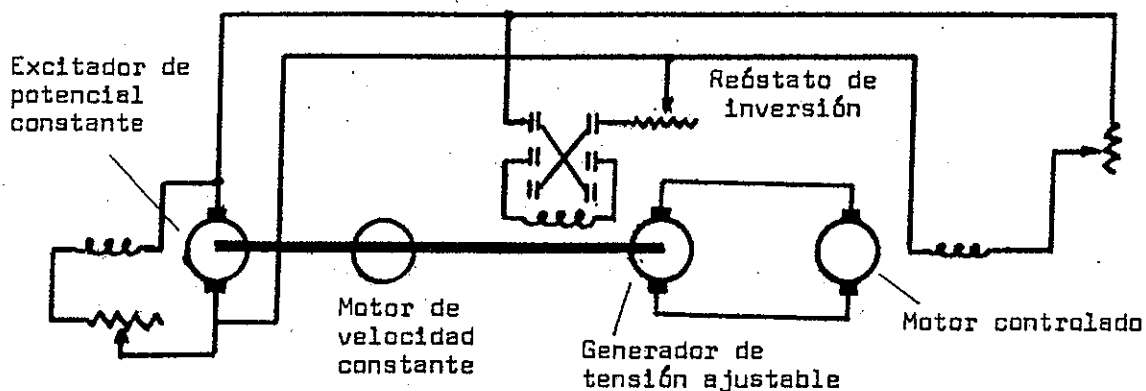


Fig. 58

El motor cuya velocidad se desea regular (motor controlado), es de "excitación independiente", realizándose el control de tensión en la armadura.

El campo inductor del generador de tensión ajustable es excitado por la tensión generada por el excitador de potencial constante y puede ser ajustado desde cero a un valor máximo en cualquier sentido por medio de un reóstato y llave inversora.

De este modo, se puede variar la tensión y permutar la polaridad en el generador de tensión ajustable, variando así, la velocidad y el sentido de rotación del motor controlado.

El método tiene el inconveniente de resultar antieconómico en cuanto al costo de la instalación auxiliar, pero es de buen rendimiento y se adapta muy bien para el control automático de la velocidad de un motor.

El margen total de variación de velocidad puede llegar a ser de 40 a 1, ya que el margen aproximado de 10 a 1, es posible lograrlo con la excitación variable del generador de tensión ajustable y, el margen adicional de 4 a 1, puede ser obtenido por el control reostático del campo inductor del motor controlado.

Las desventajas evidentes del sistema "Ward-Leonard" es que precisa de tres máquinas de capacidad de potencia esencialmente igual a la potencia del motor controlado, lo cual resulta muy costoso. Otra desventaja es que estas tres máquinas resultan mucho menos eficientes que una sola.

Debido a su costo de instalación y su baja eficiencia relativa el sistema "Ward-Leonard" ha sido reemplazado en las nuevas aplicaciones por los modernos circuitos controladores electrónicos basados en el uso de los circuitos rectificadores con SCR. (Rectificador controlado de Silicio)