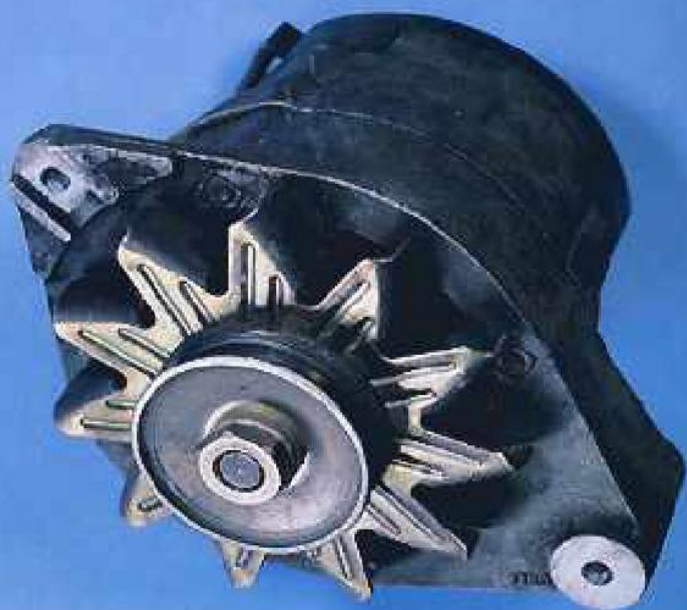


MANUAL BASICO DE MOTORES ELECTRICOS



Raúl Peragallo Torreira



COMPARTIR SOLO CON FINES
DE APRENDIZAJE

Indice de materias

PREFACIO	7
1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES SOBRE MOTORES ELECTRICOS	13
1.1. El generador elemental de corriente continua	13
1.2. Variaciones del generador elemental	17
2. GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA	26
2.1. Nociones fundamentales	26
2.2. El inducido	30
2.3. Generadores de corriente continua	33
2.4. Generadores autoexcitados	34
2.5. Saturación de los campos	37
2.6. Generadores autoexcitados del tipo en serie	38
2.7. Generadores autoexcitados del tipo en paralelo	39
2.8. Generadores autoexcitados del tipo compuesto	41
3. MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA	43
3.1. Nociones fundamentales	43
3.2. Motor elemental de corriente continua	46
3.3. Reacción del inducido	50
3.4. Fuerza contraelectromotriz	51
3.5. Velocidad del motor de corriente continua	54
4. TIPOS DE MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA	57
4.1. Introducción	57
4.2. Motores en derivación	57
4.3. Motores en serie	59
4.4. Motor compuesto (compound)	61
4.5. Rendimiento de los motores eléctricos	63

5. CONTROL DE ARRANQUE Y VELOCIDAD EN MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA	66
5.1. Introducción	66
5.2. Dispositivos de arranque normal	67
5.3. Dispositivos automáticos	68
5.4. Control de velocidad en motores de c.c.	71
5.5. Control de velocidad con resistencia en serie con el inducido	73
5.6. Control de velocidad con resistencia en serie con el campo	75
5.7. Sistemas modernos para arranque, aceleración y control de velocidad	77
6. MOTORES ELECTRICOS DE CORRIENTE ALTERNA	84
6.1. Introducción	84
6.2. Detalles del funcionamiento del motor de inducción	86
6.3. Deslizamiento	88
6.4. Motores de inducción monofásicos	90
6.5. Motores de fase dividida (o de fase auxiliar)	91
6.6. Motores de arranque capacitivo	93
6.7. Motores con polos amortiguadores	95
6.8. Tipos de motores con polos amortiguadores	97
6.9. Motores de inducción polifásicos	100
7. MOTORES SINCRONOS	102
7.1. Introducción	102
7.2. Motor síncrono de rotor tubular	103
7.3. Motor síncrono con rotor tetrapolar	106
7.4. Motor síncrono multipolar	107
8. MOTORES UNIVERSALES	110
8.1. Características generales	110
8.2. Motor para afeitadoras eléctricas	113
9. MANTENIMIENTO Y FALLOS EN LOS APARATOS ELECTRICOS	117
9.1. Generadores	117
9.2. Bujes y rodamientos	118
9.3. Mantenimiento y fallos en las escobillas y colectores	121
9.4. Verificación del aislamiento	124

10. RESUMEN DE FALLOS EN LOS MOTORES ELECTRICOS ..	129
10.1. El motor no arranca	129
10.2. Temperatura elevada en el motor	131
10.3. Ruidos, zumbidos y trepidaciones	132
GLOSARIO TECNICO	135

Conceptos fundamentales sobre motores eléctricos

1.1. EL GENERADOR ELEMENTAL DE CORRIENTE CONTINUA.

La electricidad puede producirse de diversas formas. No obstante, en todas ellas hay siempre una transformación de energía, que puede ser mecánica, térmica o química.

Uno de los métodos empleados para producir electricidad, y que, además, es de la mayor importancia, industrialmente hablando, consiste en el corte de un campo magnético por un conductor. Este fenómeno es, pues, de carácter dinámico, ya que su producción está relacionada con el movimiento relativo entre el conductor y el campo.

La figura 1-1 ilustra el proceso descrito. Si el conductor se pusiera en movimiento hacia abajo, la aguja indicadora del galvanómetro, en virtud de la corriente inducida en el conductor, se desplazaría en sentido opuesto al que se verificaría si el movimiento del conductor fuera hacia arriba. Claro es que si aplicáramos al conductor un movimiento vertical alternativo, la aguja también se movería alternativamente de derecha a izquierda y viceversa.

Lo hecho anteriormente fue poner en movimiento el conductor (lo mismo se observaría si moviéramos el imán) perpendicularmente a las líneas de fuerza magnética. Si el desplazamiento fuese paralelo a las líneas de fuerza, no se produciría ningún efecto, lo cual se observaría por la inmovilidad de la aguja del galvanómetro en medio de la escala. Deducimos entonces que la condición fundamental para

la producción de electricidad por el proceso descrito es el corte de las líneas de fuerza del campo magnético.

La tensión o fuerza electromotriz inducida cuando el conductor corta el campo magnético depende de varios factores. En primer lugar, podemos observar, con la misma experiencia de la figura 1-1, que si movemos lentamente el conductor, la aguja indicadora del galvanómetro acusará una desviación tan pequeña que será casi imperceptible. No obstante, si el movimiento fuera más rápido, la desviación de la aguja sería mayor.

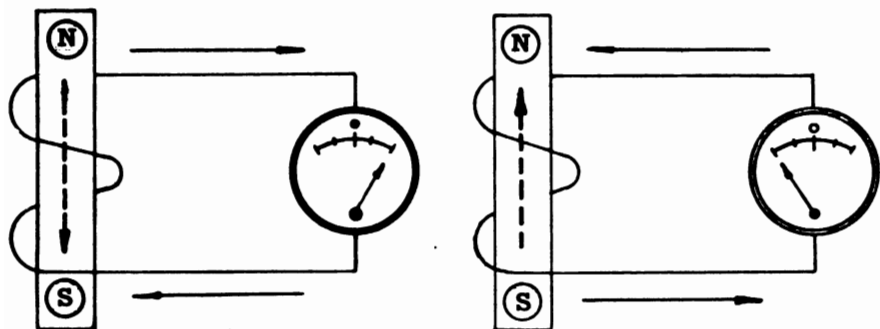


Fig. 1.1.—Inversión de la corriente inducida a causa del cambio de sentido de desplazamiento del conductor.

Otra experiencia que podríamos realizar sería cambiar el imán primitivo por otro más potente. De esta forma también obtendríamos un mayor desplazamiento de la aguja. Como tercera y última experiencia sería posible cortar el campo magnético con varios conductores (espiras) conectados en serie, percibiéndose de la misma forma el aumento de la fuerza motriz inducida.

De lo expuesto hasta aquí, podemos deducir:

1. El valor de la fuerza electromotriz inducida es directamente proporcional a la velocidad de desplazamiento del conductor en relación con el campo magnético.
2. La fuerza electromotriz inducida es directamente proporcional a la intensidad del campo magnético.

3. La fuerza electromotriz inducida es directamente proporcional al número de conductores (conectados en serie) que cortan el campo magnético.

El sentido de desplazamiento de la aguja del galvanómetro, como hemos visto, depende del sentido de movimiento del conductor en relación con el campo, lo que nos permite deducir que el sentido de la corriente inducida está determinado por el movimiento relativo entre el conductor y el campo magnético.

Estos principios, a pesar de su simplicidad, constituyen la esencia del funcionamiento de todos los generadores eléctricos. En la práctica, sin embargo, la trayectoria del conductor al cortar el campo magnético, es circular. En la figura 1-2 puede verse un generador elemental, constituido por una sola espira de conductor. En este caso particular, la tensión inducida llega al galvanómetro por medio de dos contactos que se apoyan en los anillos, que a su vez están conectados a los extremos de la espira. El lector se dará cuenta más tarde de que estos elementos se usan en los motores y generadores de corriente continua, adoptando denominaciones características. La espira giratoria se llama «inducido», y los anillos de contacto, «colectores». Las piezas fijas que tienen como función «extraer» la tensión inducida, se denominan «escobillas».

El funcionamiento del generador elemental, como es de suponer, se funda en los principios ya descritos. Al girar la espira conductora cortará las líneas de fuerza del campo magnético de tal forma que el número de líneas cortadas en la unidad de tiempo dependerá de la posición en que se encuentre la espira.

Si se observa la figura 1-2 se verá que el número de líneas de fuerza cortadas por la espira en el momento representado es mínimo, ya que el movimiento del conductor es paralelo a las líneas de fuerza. Si la espira se hubiera girado 90° en relación con la posición representada, el movimiento sería perpendicular a las líneas de fuerza, y la tensión inducida sería la máxima.

Entre los valores máximo y mínimo de la fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida, hay una serie de valores intermedios, como veremos más adelante, lo cual nos lleva a la conclusión de que la tensión de salida del generador no tiene un valor continuo. En la figura 1-3 podemos observar esto de forma más clara. La izquierda de la figura representa una sección del generador, con la espira ocupando

una serie de posiciones, marcadas de 1 a 12. Para mejor comprender lo que vamos a exponer, el lector debe imaginar la espira desplazándose sucesivamente de una posición a otra, en el sentido de las manecillas del reloj, partiendo de la posición 1. El campo magnético se supone uniforme.

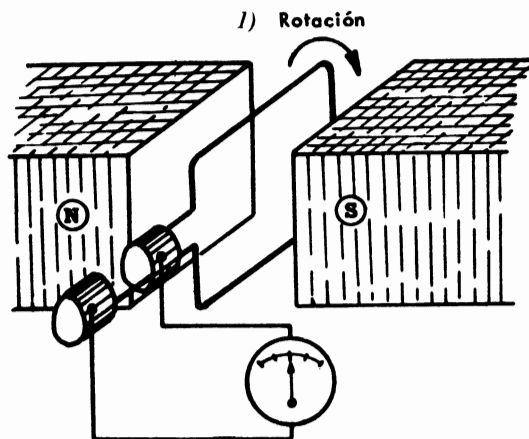


Fig. 1-2.—Generador elemental de corriente alterna.

1) Rotación.

A la derecha del generador tenemos dos ejes perpendiculares, denominados ejes coordenados. En el horizontal está indicada la posición de la espira, en grados geométricos, tomando como referencia la posición inicial de reposo (1) y en el vertical, el valor de la fuerza electromotriz que se leería en la escala de un voltímetro conectado a la salida del generador. Suponiendo que el valor máximo de la f.e.m. inducida sea de 6 V, podemos dividir el eje vertical en 6 partes iguales, lo que nos permitirá estimar inmediatamente el valor de la f.e.m. en cada posición de la espira.

En la posición 1, que corresponde a la representada en la figura 1-2, la tensión inducida es nula. De la posición siguiente, que corresponde a un giro de 30° , trazamos una paralela al eje horizontal hasta el punto de intersección con la línea vertical correspondiente a la posición de 30° . Este punto indica el valor de la tensión inducida en la espira en el momento considerado.

Repetiendo el proceso para las posiciones 3 y 4, correspondientes respectivamente a 60° y 90° , comprobamos que en (4) la f.e.m. inducida es máxima, esto es, que es máximo el número de líneas de

fuerza interceptadas por la espira en la unidad de tiempo. En las posiciones siguientes, de 5 a 7, la f.e.m. toma valores cada vez menores, llegando otra vez a cero.

Como habrá podido observarse, el eje vertical relativo a las tensiones inducidas tiene dos sentidos. El superior, que llamaremos positivo, y el inferior, negativo. De esta forma, cuando la espira llegue a la posición (4), tendremos en la salida del generador la máxima tensión negativa. Así, partiendo de cero, la tensión decrece hasta -6 V , vuelve a cero, sube hasta $+6\text{ V}$ cuando la espira llega a la posición (10) y retorna a cero cuando la espira regresa a (1).

La fuerza electromotriz inducida en nuestro generador elemental, por tanto, variará constantemente de sentido y de valor cuando desplazemos el conductor en el interior del campo magnético. Esto caracteriza una tensión alterna que es diferente de la tensión continua, ya que en ésta el sentido y el valor (amplitud) permanecen constantes.

1.2. VARIACIONES DEL GENERADOR ELEMENTAL.

En la figura 1-3 observamos que el generador elemental invierte el sentido de la fuerza electromotriz inducida por cada 180° geométricos de rotación de la espira. Esa inversión de polaridad es debida a la del sentido de movimiento del conductor cada 180° de rotación, y se ilustra en la figura 1-4, en la que están representados los dos semiciclos de la forma de onda obtenida en la salida del generador: el primero, positivo, y el segundo, negativo.

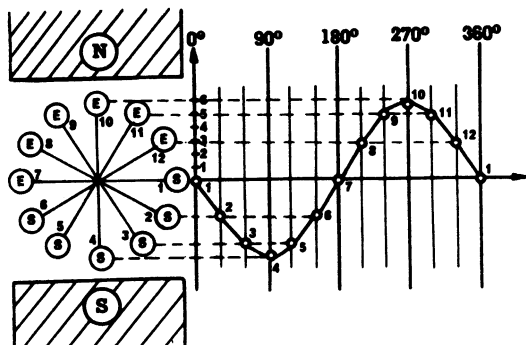


Fig. 1-3.—Variación de la fuerza electromotriz inducida.

Si en la salida del generador conectamos una carga como la ilustrada en la figura 1-5, la corriente que en ella circula cambiará de sentido alternativamente. Esa inversión periódica está representada por las dos flechas de dicha figura: una indica el sentido de la corriente en la primera mitad del ciclo, y la otra, en la segunda. Si deseásemos convertir esa corriente alterna en otra continua pulsatoria, esto es, una corriente de sentido constante pero de valor variable, con el tiempo podríamos conectar en la salida del generador una llave inversora, cuyo accionamiento permitirá la circulación de la corriente por la carga solamente en un sentido.

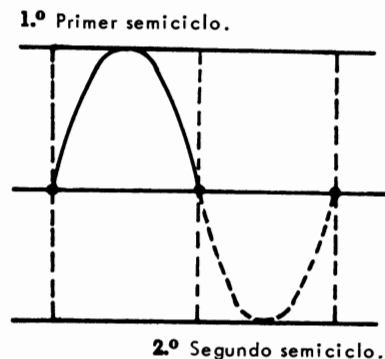


Fig. 1-4.—Inversión de la polaridad en el generador elemental de la figura 1-2.

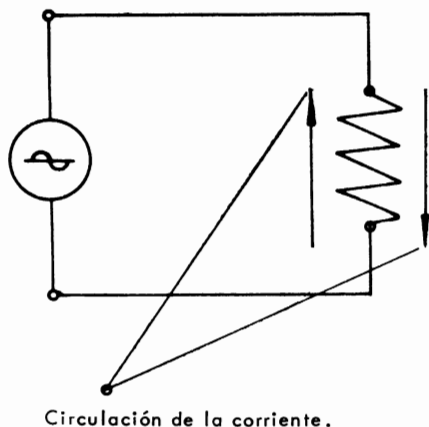


Fig. 1-5.—Inversión de la corriente que circula en una carga conectada a los terminales del generador elemental de corriente alterna.

La figura 1-6 da idea del funcionamiento de la llave inversora. Para simplificar el dibujo, sustituimos el generador por una batería, conectada ya con una polaridad, ya con la opuesta. Si no hubiese llave inversora en el circuito, la corriente de la carga mudaría de sentido cada vez que se invirtiese la polaridad de la batería. Para convertir la tensión alterna en continua, es preciso, por tanto, accionar la llave inversora cada medio ciclo, esto es, dos veces por ciclo.

Suponiendo que la velocidad de rotación de la espira del generador elemental en torno de su eje sea tal que se produzca una f.e.m.

de 60 ciclos por segundo (60 hercios), será necesario realizar 120 inversiones de la llave en un segundo. Como podemos observar a simple vista, el accionamiento de la llave con esa velocidad no puede hacerse manualmente; en la práctica, la inversión se realiza dentro del propio generador, en los anillos de contacto que, como ya hemos dicho, se denominan también «colectores».

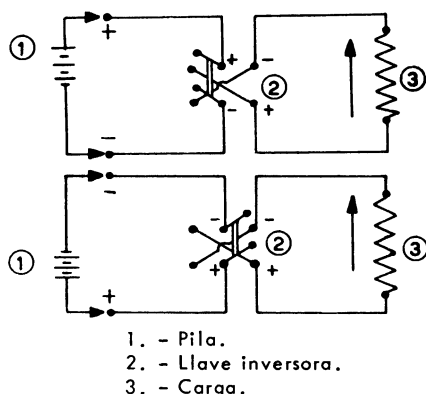


Fig. 1-6.—Circulación de la corriente en un sentido solamente.

Para realizar la inversión, como artificio mecánico, se adopta la eliminación de uno de los anillos, dividiéndose el otro en dos partes iguales, a lo largo del eje. Las dos partes, denominadas «delgas», están aisladas entre sí y también en relación con el eje del rotor.

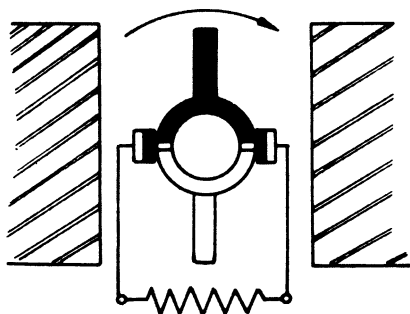


Fig. 1-7.—Vista frontal del generador elemental de corriente continua.

En la figura 1-7 se hallan representados esquemáticamente, la espira y el colector. La parte oscura de la espira está unida a la delga

superior, y la parte clara, a la inferior. El lector observará también que el eje de las escobillas es paralelo al campo magnético, estando estas escobillas dispuestas de modo que ponen las delgas en cortocircuito en la posición indicada, esto es, cuando la tensión inducida es nula. Al girar el eje del generador, el colector también gira, haciendo con ello que cada escobilla haga contacto con una delga durante media revolución.

La figura 1-8 muestra la espira y el colector en diversas posiciones, correspondientes a un giro de 360° . A fines de simplificación no se han representado los polos del imán, o sea, el campo magnético. Analizando la figura se puede sacar la siguiente conclusión:

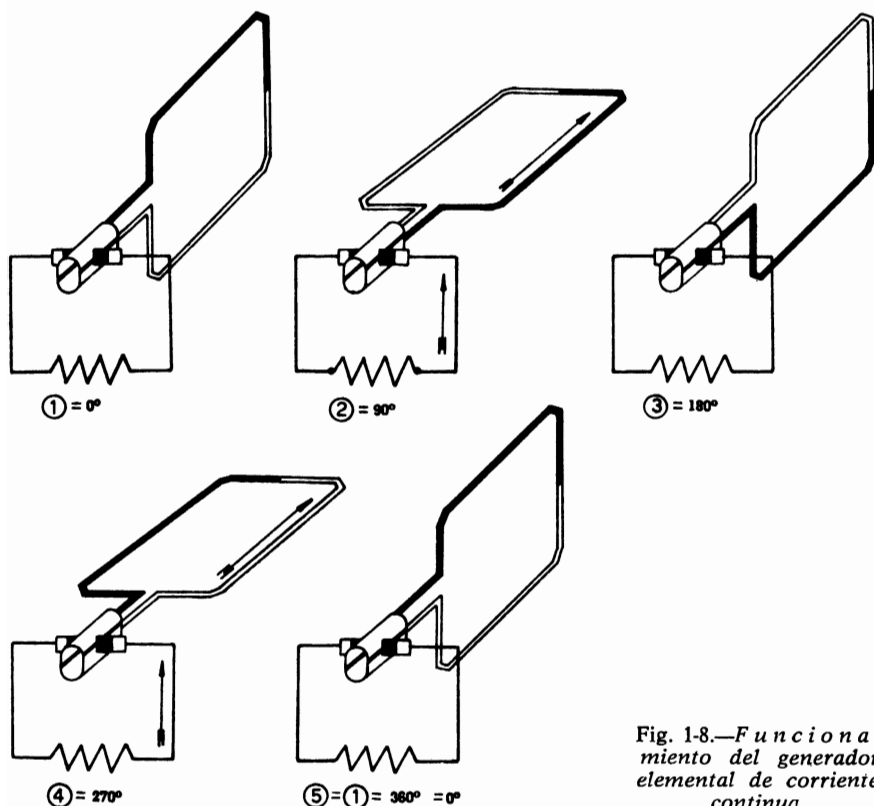


Fig. 1-8.—*Funcionamiento del generador elemental de corriente continua.*

Posición 1. (Correspondiente a una rotación de 0° .)

La dirección de desplazamiento de la espira es paralela a la de las líneas de fuerza del campo magnético, o, lo que viene a ser lo mismo, el plano de la espira es perpendicular a las líneas de fuerza. En estas condiciones la tensión inducida es nula y no circula corriente por la carga.

Posición 2. (Correspondiente a una rotación de 90° .)

En cuanto la espira se desplaza de 1 a 2, la fuerza electromotriz inducida sube desde 0 hasta su valor máximo, que corresponde al corte del mayor número posible de líneas de fuerza. Esto sucede cuando la dirección del movimiento de la espira es perpendicular a las líneas de fuerza, o sea, cuando el plano de la espira es paralelo a las líneas. Las flechas indican el sentido del recorrido de la corriente.

Posición 3. (Correspondiente a una rotación de 180° .)

De su valor máximo, alcanzado cuando la espira se encuentra en la posición de 90° , la f.e.m. inducida decrece hasta cero, anulándose cuando la espira se halla en posición opuesta a la inicial. Obsérvese que hasta este punto la escobilla de la derecha hace contacto con la delga de la mitad oscura de la espira. Como en la posición representada la f.e.m. es nula, no hay circulación de corriente por la carga.

Posición 4. (Correspondiente a una rotación de 270° .)

El sentido de desplazamiento de las secciones de la espira se invierte a partir de la posición de 180° . De esta forma, la tensión inducida pasa del valor nulo a un máximo, pero de sentido inverso al alcanzado en la posición de 90° . Si la espira estuviese unida a dos anillos, como sucede con el generador elemental de la figura 1-2, habría inversión del sentido de la corriente. No obstante, se observará que ahora la delga de la mitad oscura de la espira hace contacto con la escobilla de la izquierda, obligando a que la corriente circule en

el mismo sentido. En otras palabras, el artificio de usar un solo anillo colector, dividido a lo largo del eje, hace que la polaridad de la tensión aplicada a las escobillas, a través de las delgas, se mantenga constante.

Posición 5. (Correspondiente a una rotación de 360° .)

A partir de la posición 4, la tensión inducida comienza a decrecer del valor máximo a cero, anulándose cuando la espira llega a 360° , o sea, al volver a la posición inicial.

La figura 1-9 muestra las variaciones de la tensión aplicada a las escobillas con la espira en las posiciones indicadas en la figura 1-8. Como la carga del generador es resistiva a la corriente que en ella circula, sufre una variación idéntica.

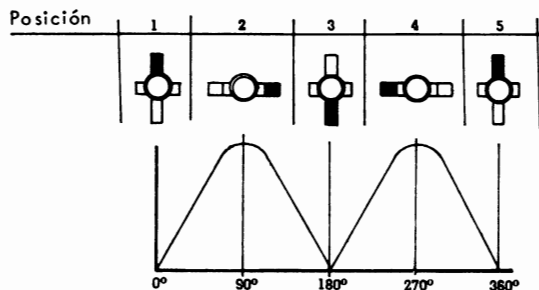


Fig. 1-9.—Valores de la fuerza electromotriz inducida para diferentes posiciones del generador elemental de c.c.

Al comienzo del presente capítulo se dijo que la f.e.m. inducida en un conductor que se desplaza en un campo magnético uniforme es proporcional a la velocidad del conductor en relación con el campo. Con fines explicativos vamos a suponer que disponemos de algún medio para variar la velocidad del generador, y que, además, poseemos instrumentos de medida destinados a determinar la velocidad de giro (tacómetro) y la fuerza electromotriz inducida (voltímetro).

Variando la velocidad de rotación del generador, se obtendrán diversos valores de tensión, cada uno correspondiente a un valor de velocidad. Llevando los resultados de las medidas a dos ejes coorde-

nados, correspondiendo el horizontal a los valores de velocidad (revoluciones por minuto o, abreviando, r.p.m.), y el vertical, a los de f.e.m. inducida (voltios), obtendremos el gráfico de la figura 1-10.

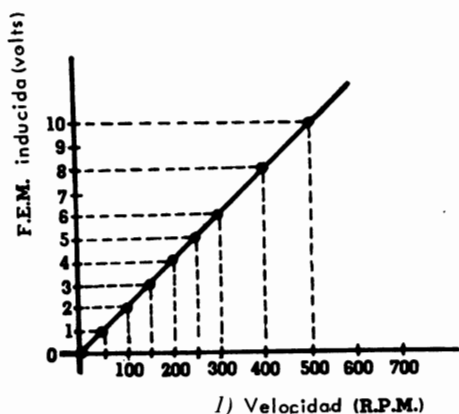


Fig. 1-10.—Variación de la f.e.m. inducida en función de la velocidad.

1) Velocidad (r.p.m.)

1) Velocidad (R.P.M.)

Como podemos observar, por cada variación de 100 r.p.m. en la velocidad del generador, tenemos otra correspondiente de 2 V en la f.e.m. inducida, lo que nos lleva a la conclusión de que la relación entre las dos magnitudes es directa. Esto quiere decir que si a 100 r.p.m. le corresponden 2 V, a 200 le corresponderán 4 voltios, y a 500 r.p.m. le corresponderán 10 V.

Por lo que observamos en la figura 1-9, la polaridad de la tensión aplicada a las escobillas del generador de la figura 1-7 se mantiene constante, pero su carácter es variable, lo que hace que la corriente que circula por la carga sea continua, aunque pulsatoria. Un generador de corriente continua de ese tipo no tiene muchas aplicaciones prácticas, pues lo que se desea en la gran mayoría de los casos es que la tensión generada tenga polaridad uniforme y que su valor sea, por lo menos, aproximadamente constante.

La solución al problema es bastante simple, consistiendo en la adición de nuevas espiras al generador elemental de c.c. Si, por ejemplo colocamos una espira a un ángulo de 90° con la primera, dividiendo el colector en cuatro delgas, cuando la f.e.m. inducida en una de ellas sea nula, en la otra será máxima, dando origen a cuatro va-

lores máximos durante la rotación de 360° , o sea, cuatro valores máximos por ciclo.

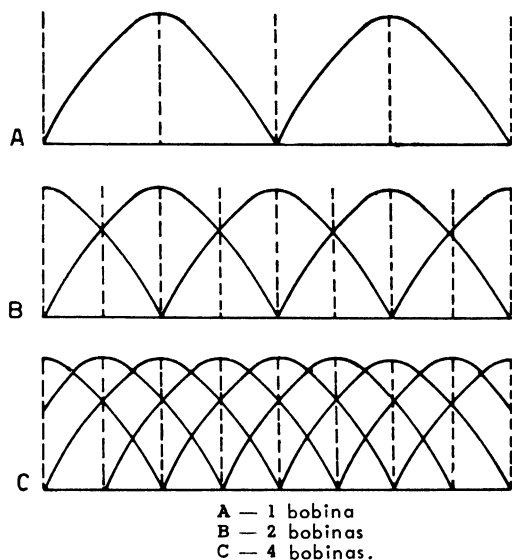


Fig. 1-11.—Valores de la f.e.m. inducida al añadir un mayor número de bobinas al generador elemental.

De la misma forma, si usamos cuatro espiras en vez de dos, dividiendo el colector en ocho delgas, tendremos ocho valores máximos por ciclo, y así sucesivamente. En consecuencia, la tensión aplicada a las escobillas se aproxima cada vez más a una tensión continua pura, como puede observarse en la figura 1-11, donde las líneas llenas indican la forma de onda de la tensión de salida.

CUESTIONARIO

- 1) ¿Cuáles son las transformaciones de energía posibles para la producción de energía eléctrica?
- 2) ¿Cuál es la forma de producir electricidad de mayor importancia industrial?
- 3) ¿Cómo se llama el aparato que indica el paso de una corriente eléctrica por un conductor?

- 4) *¿Cuál es la condición fundamental para que se produzca corriente eléctrica partiendo de un campo magnético?*
- 5) *¿A qué es directamente proporcional el valor de la f.e.m. inducida?*
- 6) *¿Cómo se denomina la espira giratoria de un motor o generador?*
- 7) *¿Qué sucede con la fuerza electromotriz inducida en el generador elemental cada medio ciclo?*

2

Generador de corriente continua

2.1. NOCIONES FUNDAMENTALES.

Es común en el estudio de las máquinas eléctricas, el analizar conjuntamente el funcionamiento de los generadores y de los motores, considerando que la diferencia fundamental entre ellos reside en que el generador *recibe* energía mecánica en su eje, casi siempre procedente de una turbina hidráulica o de vapor, o incluso de un motor, ya sea de combustión interna o eléctrico. El motor eléctrico, por el contrario, *abastece* de energía eléctrica a su eje, obteniéndose dicha energía por la transformación de la eléctrica que se le ha cedido.

Procediendo de esta forma, llegamos al conocimiento de los principios fundamentales que rigen el funcionamiento de los generadores y, debido a la semejanza que existe entre ellos, realizamos el debido estudio del funcionamiento de los motores. Tanto unos como otros están constituidos por una parte fija, denominada *estator* (que en nuestro generador elemental está representado por el imán permanente, responsable del mantenimiento del campo magnético uniforme), y una parte móvil, llamada *rotor*.

En la práctica, el campo magnético del generador no se produce por un imán permanente, sino por un bobinado doble o cuádruple, que recibe el nombre de *bobina de campo*. Como sabemos, para que una bobina mantenga un campo magnético uniforme y constante a su alrededor es preciso que sea alimentada por una corriente continua de valor constante. La bobina de campo de los generadores reales, por tanto, se alimenta con un generador de c.c. externo o, en

muchos casos, con una unidad mecánicamente acoplada al generador principal o con la propia f.e.m. generada, como veremos más adelante.

El estator y las piezas polares forman parte de una estructura única. La función de esa masa de hierro, no obstante, no es la de dar forma a la máquina, sirviendo principalmente como parte de su circuito magnético. En la figura 2-1 podemos observar una carcasa con las piezas polares, estando la de la derecha dispuesta como bobina de campo.

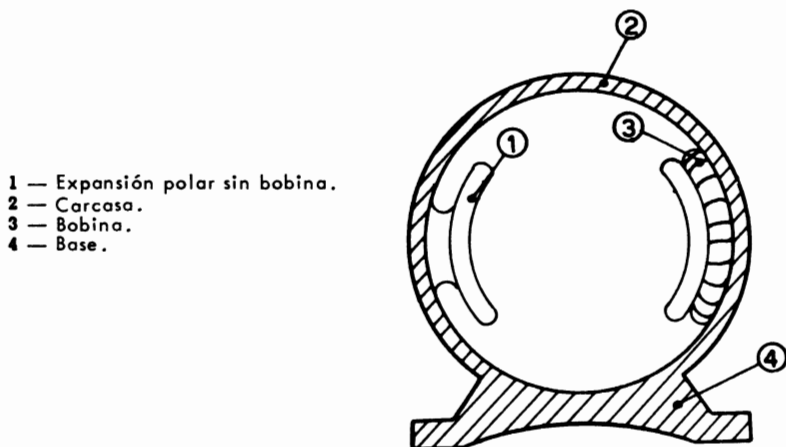


Fig. 2-1.—Carcasa y bobina de campo.

En los generadores primitivos se solía fundir en un solo bloque de hierro dulce la carcasa y las piezas polares; actualmente, las piezas polares se construyen con láminas de hierro superpuestas, con el fin de disminuir las pérdidas provocadas por el calentamiento producido por la circulación de corrientes parásitas, hecho que se explicará en el estudio de los transformadores.

Las piezas polares, como puede observarse en la figura 2-1, tienen una forma muy especial, concéntrica con la carcasa. Esto es necesario para que se pueda aprovechar al máximo el campo magnético

producido, y ha sido el resultado de detenidos estudios encaminados a la obtención de un campo concentrado con el máximo rendimiento.

Las bobinas de campo se arrollan en moldes especiales, con hilo de cobre aislado con barniz, algodón o rayón, y después se recubren con un tira de algodón. Después se lleva la bobina a un horno de temperatura moderada, con el fin de que se elimine la eventual humedad existente en el aislamiento del hilo o en el recubrimiento de algodón, sumergiéndose a continuación en barniz aislante. Una vez hecho esto se lleva de nuevo al horno para el secado final. Las dimensiones de los moldes y de las bobinas acabadas, naturalmente, deben ser tales que el conjunto encaje sin holgura en el espacio comprendido entre la pieza polar y la carcasa. En la figura 2-2 podemos ver el aspecto de una bobina de campo acabada.

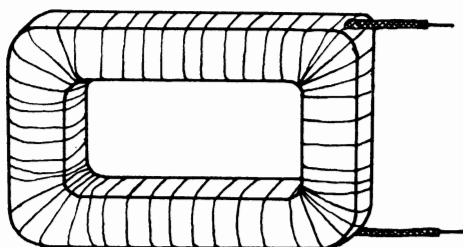


Fig. 2-2.—Bobina de campo.

En ambos extremos de la carcasa se hallan situadas las tapas (dos piezas de hierro fundido), cuya función es esencialmente mecánica. En el centro de cada tapa hay un cojinete, en el que se aloja el eje del rotor. Una de las tapas está dotada de un portaescobillas cuya función es mantener en posición las escobillas de carbón que hacen contacto permanente con el anillo colector. En la figura 2-3 puede observarse, en forma bastante simplificada, un tipo de portaescobillas que, en cualquier caso, está aislado de la carcasa de la máquina. Las escobillas son de carbón especial, de sección cuadrada, rectangular o circular. El extremo superior de cada escobilla, o sea, el opuesto al que hace contacto con el colector, está cobreado electrolíticamente, con objeto de que pueda soldarse al conductor que conectará la escobilla al respectivo borne de la máquina.

El carbón de que están hechas las escobillas debe tener características específicas, esto es, ha de ser compacto, de gran homogeneidad y de dureza relativa; en ciertos casos se utilizan escobillas de grafito. De cualquier forma, no obstante, el contacto entre las escobillas y el colector debe ser firme y constante, siendo éste el motivo por el que el portaescobillas está dotado de un sistema de muelles que comprimen las escobillas contra los anillos, sistema éste que difiere según el fabricante de la máquina.

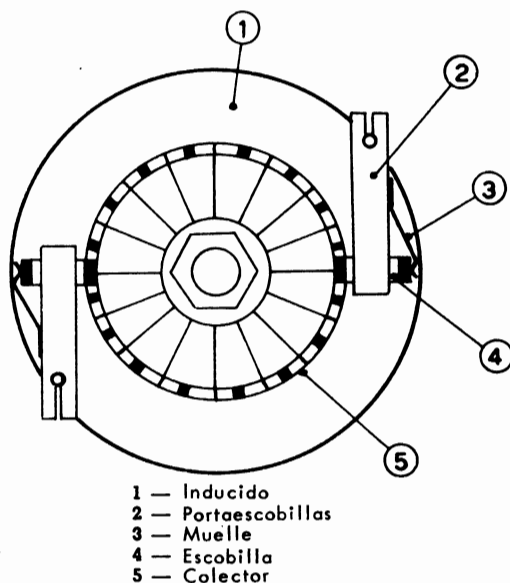


Fig. 2-3.—Portaescobillas simplificado.

Entre los polos del estator gira el rotor, armadura o inducido, mantenido en posición por los muelles de las tapas. Al tratar de nuestro generador elemental, representamos el rotor por una única espira de conductor. El inducido de las máquinas reales, sin embargo, está formado por un eje de acero templado, un núcleo de hierro laminado con ranuras longitudinales, dentro de las cuales está arrollado el bobinado correspondiente y el colector. En la figura 2-4, para mejor comprensión, se muestra la disposición de los elementos antes mencionados. El colector está constituido por piezas de cobre endurecido, separadas entre sí y del eje del rotor por láminas de mica.

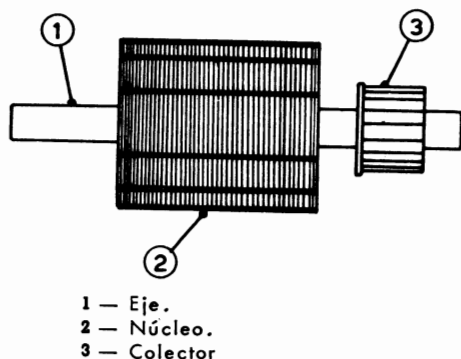


Fig. 24.—Aspecto del rotor.

2.2. EL INDUCIDO.

El inducido, llamado también «armadura» está constituido por el eje del generador, el devanado, el núcleo y el colector. Tanto el núcleo como el devanado están situados dentro del campo magnético producido por el estator, de forma que al moverse la armadura en el interior del campo se induce una fuerza electromotriz en el devanado, que se obtiene en la salida del generador.

No obstante, también el núcleo del inducido está constituido por material conductor, y por eso también en él se inducirá una fuerza electromotriz, perjudicial para el funcionamiento del generador, pues da origen a corrientes parásitas que, a su vez, producen calor. Si el núcleo del inducido está formado por un sólo bloque de hierro, su sección es grande y, por tanto, su resistencia, baja. Así, la corriente que por él circula es de gran intensidad, produciendo bastante calentamiento, ya que éste aumenta con el cuadrado de la corriente ($P = R \cdot I^2$).

El calentamiento producido por las corrientes parásitas del inducido, no sólo reduce el rendimiento de la máquina, sino que también actúa de modo adverso, en el sentido de que daña prematuramente el aislamiento de los conductores. Por esta razón las máquinas eléctricas están dotadas de inducidos constituidos por el apilamiento de chapas de hierro dulce aisladas entre sí, disposición que reduce al mínimo los efectos de las corrientes parásitas, sin por ello anu-

larlas, ya que únicamente tiende a aumentar la resistencia del inducido.

La mayor parte de los motores y generadores modernos de corriente continua emplean un tipo de inducido denominado de «tambor», que se ilustra en la figura 2-5. Este inducido está formado por un tambor cilíndrico, con su periferia dividida longitudinalmente por ranuras, en el interior de las cuales van arrolladas las bobinas. El arrollamiento no se hace directamente sobre el hierro, sino sobre el revestimiento interno de las ranuras, que es de papel aislante, y que tiene como función la de preservar el aislamiento de los hilos, evitando posibles cortocircuitos provocados por la eventual existencia de rebabas, o incluso por los bordes del núcleo del inducido.

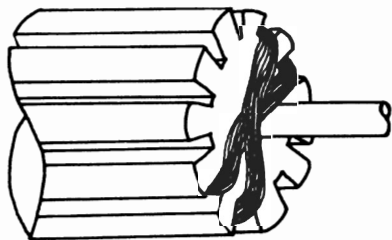


Fig. 2-5.—Inducido de tipo tambor.

La figura 2-6 representa dos tipos de ranuras, mostrando el espacio ocupado por el devanado y la posición del papel aislante. En (A) tenemos una ranura con devanado simple y en (B) otra con devanado doble.

En los motores y generadores de gran tamaño el inducido es igualmente grande, y en este caso las bobinas no están devanadas directamente sobre el tambor, como en el caso de los inducidos pequeños. Para ese tipo de motor o generador, las bobinas se devanan por separado, en moldes de madera o metal de forma apropiada; posteriormente se recubren con cinta de algodón o de plástico y se barnizan, colocándose después en las ranuras, por un procedimiento semejante al de las bobinas de campo. En los motores pequeños, como los utilizados en los exprimidores, aspiradores y perforadoras portátiles, los devanados se hacen mecánicamente con máquinas especiales.

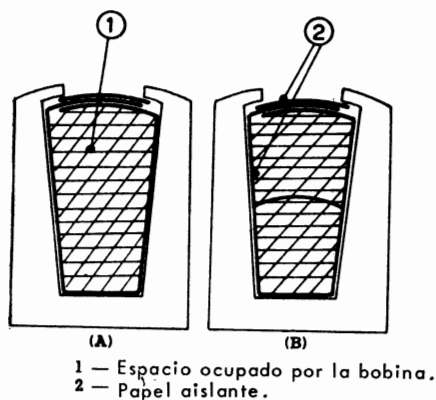


Fig. 2-6.—Colocación del papel aislante en las ranuras de los devanados.

Una característica importante de la bobina es su paso, que se define como el ángulo entre los ejes de las ranuras en que se hallan los dos lados de la bobina. Ese ángulo se determina también en función del número de ranuras existentes en el inducido. En las figuras 2-7 y 2-8 pueden observarse los pasos de las bobinas de dos generadores, el primero de dos polos, y el segundo de cuatro.

Fig. 2-7.—Paso correspondiente a un generador de dos polos.



Si el paso de las bobinas es del tipo denominado total o completo, habrá de calcularse de forma que en el momento en que uno de los conductores de la bobina pase por debajo del centro de un polo, el otro conductor esté en idéntica posición con relación al polo siguiente. En la figura 2-7, correspondiente al generador de dos polos, el paso de la bobina es de 180° geométricos u ocho ranuras, mientras que en la figura 2-8, correspondiente al generador de cuatro polos, el paso es de 90° geométricos o cuatro ranuras. Es conveniente recordar el

siguiente axioma para la determinación del paso de una bobina: *el paso de una bobina es igual al número de ranuras que contiene menos una.*

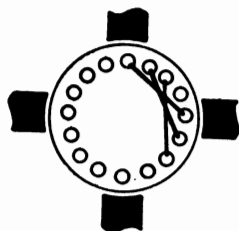
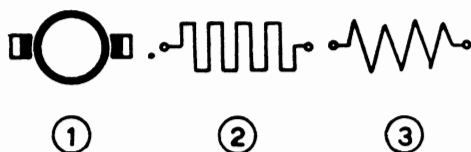


Fig. 2-8.—Paso correspondiente a un generador de cuatro polos.

2.3. GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA.

Todos los generadores de corriente continua, a excepción de los dotados de imán permanente para la formación del campo, tienen un campo electromagnético generado por una corriente continua procedente de una fuente externa o del propio generador. El abastecimiento de la corriente continua para alimentar los campos del estator se llama *excitación*, función que puede ser ejercida por un acumulador o por otro generador de pequeña capacidad denominado *excitador*.



- 1 — Motor
- 2 — Bobina de campo
- 3 — Resistencia de carga

Fig. 2-9.—Símbolos usados en la representación gráfica de motores y generadores.

Cuando los campos del estator tienen que excitarse por separado, el generador se denomina *de excitación independiente*. Cuando parte de la tensión generada por el generador se aprovecha para realizar la excitación de los campos, el generador se denomina *autoexcitado*. La figura 2-9 ilustra los símbolos usados en la representación gráfica

de los circuitos de las máquinas eléctricas, como, por ejemplo, el de la figura 2-10, donde vemos el circuito de un generador de excitación independiente o separada.

Como puede observarse en el circuito de la figura 2-10, los generadores de excitación independiente tienen dos circuitos distintos: el de campo, constituido por los arrollamientos del estator, alimentados por una batería de acumuladores y por un excitador, y el circuito constituido por el inducido y por la carga externa, representada por una resistencia. Este tipo de generador tiene sus ventajas y sus inconvenientes, siendo el principal de éstos su tamaño, grande en relación con los demás tipos. En contrapartida, tiene la ventaja de permitir el ajuste de la tensión de salida por medios mucho más sensibles, tales como mandos electromecánicos, servomecanismos, amplificadores y otros sistemas, que actúan en el circuito de campo.

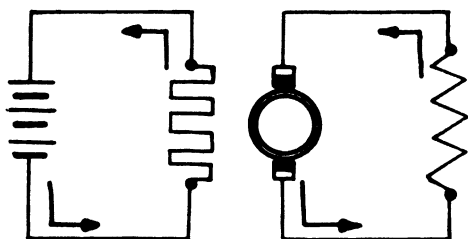


Fig. 2-10.—Circuito de un generador de excitación independiente.

Por lo anteriormente expuesto, y también porque la polaridad de la tensión de salida de los generadores de excitación independiente puede invertirse con facilidad, esas máquinas se emplean cuando el control de las características de la tensión de salida es indispensable para la realización de un determinado servicio.

2.4. GENERADORES AUTOEXCITADOS.

Como ya se ha dicho, en los generadores autoexcitados, parte de la tensión generada se aprovecha para alimentar los campos del propio generador. Puede preguntarse entonces cómo se genera el primer impulso de tensión si, aparentemente, con la máquina parada, no hay ningún campo magnético presente. La solución hallada al problema es simple, ya que se aprovecha una propiedad del núcleo de

las bobinas de campo del generador. Este núcleo, a pesar de ser de hierro dulce, y teóricamente incapaz de retener sus propiedades magnéticas, cuando deja de circular corriente por las bobinas de campo, en realidad permanece ligeramente imanado cuando la corriente de campo deja de circular. Este campo magnético se denomina *campo remanente* y, a pesar de ser muy débil, es suficiente para que al arrancar el generador aparezca una tensión en los bornes de salida de la máquina.

Debido a las conexiones internas del generador, una parte de la tensión generada en el arranque se aplica a las bobinas de campo, creando un campo electromagnético que se suma al remanente, provocando el aumento de la tensión de salida. El proceso continúa hasta que la f.e.m. generada y el campo alcanzan sus valores nominales, lo que en realidad ocurre en un tiempo muy pequeño, siendo difícil medir la variación de tensión de la salida con instrumentos normales.

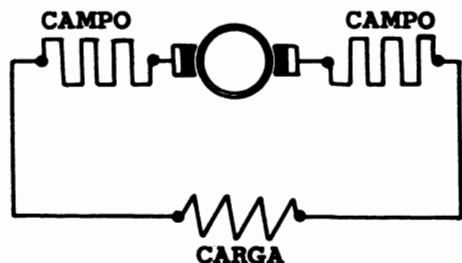


Fig. 2-11.—Generador autoexcitado de tipo en serie.

Todos los generadores de c.c. autoexcitados funcionan, como acabamos de describir, difiriendo solamente en cuanto a las conexiones internas. Las figuras 2-11, 2-12 y 2-13 muestran esquemáticamente cómo se hacen las conexiones en los tres tipos fundamentales de generadores autoexcitados.

En el de la figura 2-11, las bobinas de campo están conectadas en serie con el inducido, y la carga está representada por una resistencia. Así, toda la corriente que circula por la carga pasa también por las bobinas de campo, y si no hay ninguna carga conectada a la salida del generador, no hay inducción de fuerza electromotriz, ya que el circuito está abierto. En este tipo de generador, denominado *en serie*, las bobinas de campo están constituidas por un pequeño número de espiras de hilo grueso, ya que la corriente que circula por ellas es elevada.

En la figura 2-12 podemos observar las conexiones de un generador de corriente continua, denominado *en paralelo*, *en derivación* o *shunt*, en el que el devanado del campo está conectado en paralelo con el inducido. De esta forma, la corriente del inducido alimenta la carga y campo, y aunque no haya carga en la salida del generador habrá siempre una fuerza electromotriz inducida, pues el campo está permanentemente alimentado. En este caso, el devanado de campo está constituido por un gran número de espiras de hilo de pequeño diámetro, para evitar que el estator absorba una gran parte de la corriente generada, esto es, que la potencia consumida en la excitación sea únicamente una pequeña parte de la generada, siendo la mayor parte de esta potencia entregada a la carga.

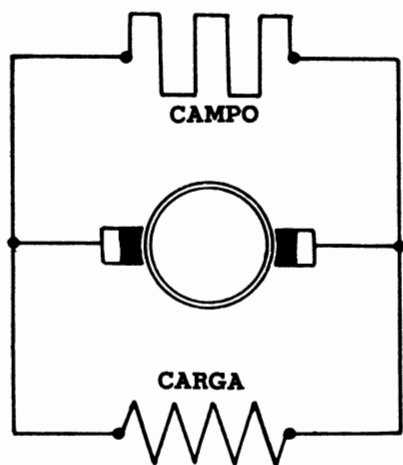


Fig. 2-12.—Generador autoexcitado de tipo paralelo.

La figura 2-13 representa un tipo de generador que es una combinación de los dos anteriormente estudiados, por lo cual se llama *compuesto* o *compound*. En él, uno de los campos está conectado permanentemente en paralelo con el inducido, y el otro, en serie con el inducido y la carga, de tal forma que el devanado en paralelo se alimenta por la tensión existente entre las escobillas y el devanado en serie está recorrido por la corriente recogida por la carga. Por tanto, cuanto mayor sea esta corriente, mayor será también la intensidad del campo magnético.

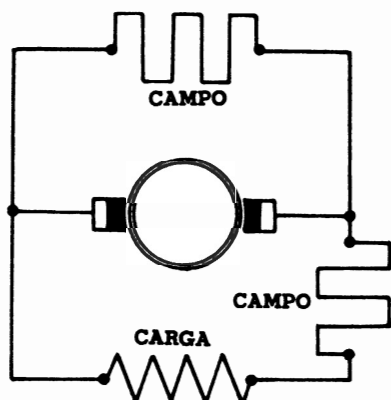


Fig. 2-13.—Generador autoexcitado de tipo compuesto.

Más adelante trataremos con mayor detalle cada uno de los tipos de generadores de corriente continua autoexcitados. Vamos a hacer un breve paréntesis para exponer en pocas palabras el problema de la saturación en las máquinas de corriente continua.

2.5. SATURACION DE LOS CAMPOS.

En todos los circuitos electromagnéticos, la intensidad de campo depende, como ya se sabe, del número de amperios-vueltas de las bobinas y de la reluctancia del circuito magnético. En lo que concierne a los devanados de campo de los estatores, considerando el número de espiras como una cantidad fija, determinada por el fabricante del generador junto con la reluctancia del circuito magnético, la única magnitud que puede variarse es la corriente que circula por las bobinas.

Sabemos que la f.e.m. inducida es proporcional a la intensidad del campo magnético y a la velocidad de rotación del inducido. Así, si uno de estos factores se redujese a cero, la f.e.m. inducida se anularía.

Al crecer la corriente que circula por las bobinas del campo, aumenta también la f.e.m. inducida. Este aumento, no obstante, sólo es proporcional hasta un cierto límite, pues la intensidad de campo, debido a la variación de la reluctancia del circuito magnético con

un grado de magnetización del hierro, no puede considerarse como proporcional a la corriente, sino dentro de ciertos límites. Como mejor puede entenderse esto es considerando que la permeabilidad del material magnético disminuye al aumentar la densidad de flujo, creciendo con esto la reluctancia del circuito. Este fenómeno se conoce por *saturación del material magnético*.

#

2.6. GENERADORES AUTOEXCITADOS DEL TIPO EN SERIE.

En los generadores de corriente continua en que el campo está conectado en serie con el inducido, la corriente sólo pasa por el circuito cuando está conectada una carga externa. Por eso, la corriente que circula por los devanados de campo depende hasta cierto límite del valor de la carga.

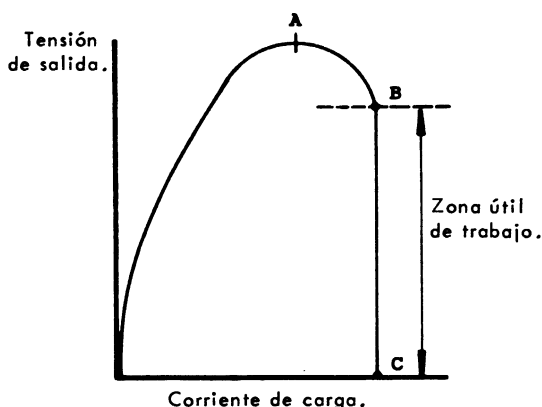


Fig. 2-14.—Curva característica de generación de tipo serie.

La figura 2-14 muestra la curva de variación de la tensión de salida de un generador de c.c. del tipo en serie, en función de la corriente requerida por la carga. Se observará que, a medida que la carga consume más corriente, aumentando en consecuencia el campo magnético del estator, la tensión de salida del generador también aumenta. En estas condiciones, el generador entra en la zona de funcionamiento donde la saturación ya se hace patente y, a partir del punto A, un aumento de la corriente de carga provoca una reducción de la tensión de salida, pues al efecto de la saturación hay que sumar el

provocado por la caída de la tensión IR en el devanado de campo, sin que haya un aumento en la tensión de salida que lo compense. Así, a partir del punto B , la tensión de salida disminuye rápidamente, incluso sin haber un aumento sustancial de la corriente de carga, ya que el tramo BC es prácticamente vertical al eje de corrientes.

De lo expuesto anteriormente podemos sacar una conclusión: la regulación de la tensión de salida de un generador de c.c. del tipo en serie es mala. Por ello, la única aplicación posible de este tipo de generador es el funcionamiento como generador de corriente constante, operando en el tramo BC de la curva de saturación.

2.7. GENERADORES AUTOEXCITADOS DEL TIPO EN PARALELO.

En los generadores de corriente continua autoexcitados del tipo en paralelo, el campo queda permanentemente conectado en paralelo con el inducido. De esta forma, la corriente de excitación del campo depende únicamente de la fuerza electromotriz inducida y de la resistencia del devanado de campo.

Para que podamos aprovechar al máximo la corriente generada es preciso que se reduzca la corriente de excitación, lo que se consigue aumentando el número de espiras del devanado de campo, que en este caso puede devanarse con hilo de pequeño diámetro. Teniendo en cuenta que incluso con la carga desconectada hay siempre una corriente circulando por el campo, deducimos que existe tensión en los bornes de salida del generador, aun con la carga desconectada, lo que no ocurriría con el generador del tipo en serie.

En la figura 2-15 podemos observar la curva característica de este tipo de generador; mediante el análisis de la curva sacamos la conclusión de que a medida que la carga absorbe más corriente, decrece la tensión de salida paulatinamente, debiéndose esta reducción al aumento de la caída de tensión en el arrollamiento del inducido. Aun así podemos decir que el generador de c.c. autoexcitado del tipo en paralelo o «shunt» tiene una tensión de salida aproximadamente constante cuando alimenta cargas que no exceden de la máxima especificada por el fabricante. Por eso este aparato está indicado para alimentar sistemas en los que sea necesario mantener la tensión dentro de ciertos límites, a pesar de las posibles variaciones de carga.

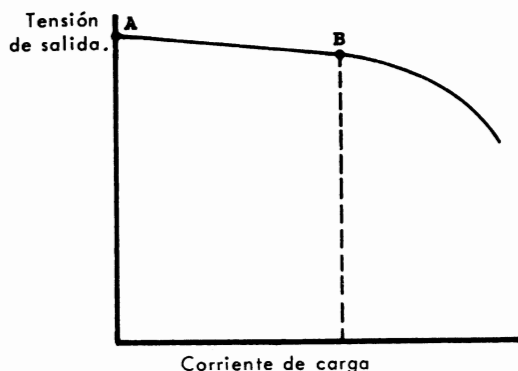


Fig. 2-15.—Curva característica del generador tipo paralelo.

Volviendo a la figura 2-15, vemos que si la corriente de carga pasa del valor fijado por el punto *B*, ya no es posible mantener la tensión de salida en valores aproximadamente constantes, pues pasado ese punto, pequeñas variaciones de carga pueden provocar grandes fluctuaciones de la tensión de salida del generador. Teniendo en cuenta que la corriente de campo es normalmente de valor reducido, se puede ajustar la tensión de salida del generador autoexcitado del tipo en paralelo por medio de un reóstato intercalado en el circuito del campo, como muestra la figura 2-16.

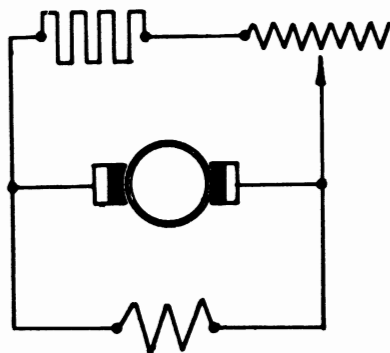


Fig. 2-16.—Regulación manual de la tensión de salida de un generador tipo paralelo.

2.8. GENERADORES AUTOEXCITADOS DEL TIPO COMPUESTO.

El generador compuesto, o «compound», como vimos anteriormente, reúne las características de los generadores de los tipos en serie y en paralelo, pues está dotado de dos devanados de campo, uno en paralelo y otro en serie con el inducido. El campo en serie, normalmente formado con pocas espiras de hilo de grueso calibre, está conectado de forma que refuerza el campo conectado en paralelo, a pesar de haber una conexión denominada «compound» diferencial, en la cual se da exactamente el caso opuesto, esto es, el campo en serie se opone al campo en paralelo.

En las figuras 2-17 y 2-18 se ilustran dos circuitos de generadores compuestos que, en realidad, conducen a efectos bastante semejantes. En el primero, el campo paralelo está conectado en paralelo únicamente con el inducido, denominándose la conexión «paralela corta». En la figura 2-18, el campo paralelo está conectado a los bornes de salida de la máquina, esto es, en paralelo con el inducido y el campo en serie, denominándose la conexión «paralela larga».

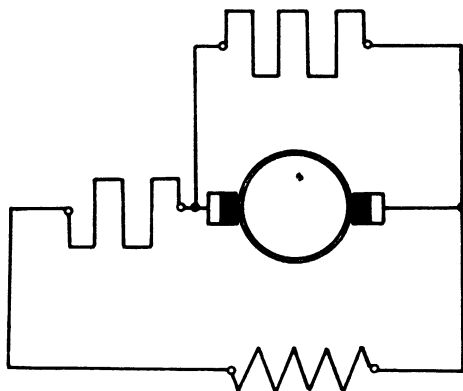


Fig. 2-17.—Circuito de un generador compuesto paralelo corto.

En el generador compuesto, la tensión de salida es aproximadamente constante, aumentando ligeramente al hacerlo la carga. Esto se debe a la existencia de un campo en serie con la carga, lo que confiere a este generador parte de las características del generador del tipo en serie. Se comprenderá, por tanto, que las características

de funcionamiento del generador compuesto dependen de la relación existente entre los campos en paralelo y en serie.

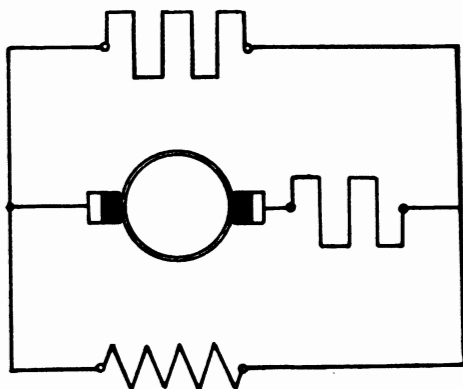


Fig. 2-18.—Circuito de un generador compuesto paralelo largo.

CUESTIONARIO

- 1) *¿Cuál es la diferencia existente entre generadores y motores eléctricos?*
- 2) *¿Cómo se denomina la parte fija de los generadores y motores?*
- 3) *¿Cómo se devanan las bobinas de campo? Dígase el tipo de conductor utilizado en el devanado.*
- 4) *¿Cuáles son las características del carbón con que se construyen las escobillas?*
- 5) *¿Cómo se forma el inducido? Citense las partes que lo constituyen.*
- 6) *¿Cuál es el paso de una bobina?*
- 7) *¿Cómo se genera el campo electromagnético en los motores de corriente continua?*
- 8) *¿Cómo están conectadas eléctricamente las bobinas de campo en relación con el inducido en el motor o generador de tipo «shunt» o en derivación?*
- 9) *Explíquese por qué la intensidad de campo es siempre proporcional a la corriente.*
- 10) *¿Qué es un generador compuesto?*

Motores de corriente continua

3.1. NOCIONES FUNDAMENTALES.

Al comienzo del capítulo anterior se dijo que la diferencia fundamental entre un generador y un motor consiste en el sentido en que se procede a la transformación de energía. El generador convierte la energía mecánica, suministrada por un motor o turbina primaria, en energía eléctrica. El motor, por el contrario, convierte la energía eléctrica en mecánica. Tratándose de aparatos de corriente continua, cualquiera de ellos puede funcionar indistintamente como generador o como motor. No obstante, en la práctica no ocurre esto, debido a consideraciones de proyecto.

La figura 3-1 ilustra el motor de c.c. más elemental que se puede concebir. Al circular una determinada corriente por la bobina, se establece un campo magnético que tiende a reaccionar contra el campo uniforme producido por el imán permanente. Esta reacción se presenta en forma de repulsión entre polos de la misma naturaleza, produciendo un par que tiende a girar la espira alrededor de su eje.

El sentido de rotación de la bobina puede determinarse de forma bastante simple si se conoce el sentido de circulación de la corriente. Esto puede hacerse por la Regla de Fleming, que consiste en lo siguiente: *colocando los dedos pulgar, índice y medio de la mano derecha de modo que formen ángulos rectos entre sí, orientaremos el índice en el sentido del campo uniforme (de norte a sur), y el medio en el sentido del desplazamiento de la corriente (del polo negativo al positivo de la batería). El dedo pulgar indicará entonces el sentido*

de la fuerza que actúa en el conductor, esto es, el sentido de desplazamiento del conductor alrededor del eje de la bobina, en el instante considerado.

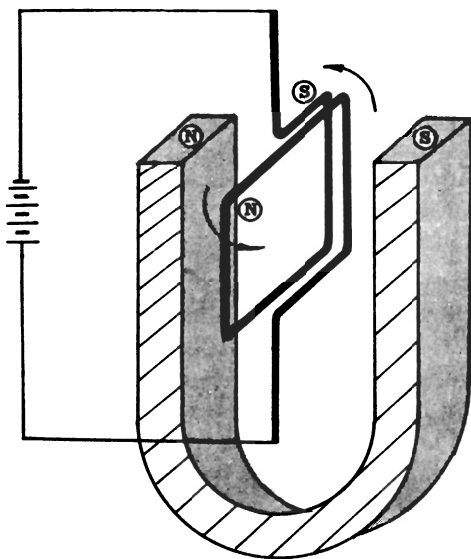


Fig. 3-1.—Motor elemental.

Otro concepto de importancia fundamental en el estudio de los motores eléctricos es el que se refiere a la llamada Ley de Lenz, que explicaremos seguidamente. *Todo conductor eléctrico recorrido por una corriente tiene a su alrededor un campo magnético.* Esto, evidentemente, también ocurre en el caso de que la corriente se produzca por una fuerza electromotriz inducida. En la figura 3-2 se ilustra esto, y el sentido de las líneas de fuerza del campo magnético se puede determinar por la regla del sacacorchos, que dice lo siguiente: *La rotación de un sacacorchos que se desplaza en el sentido de la corriente que recorre un conductor, determina el sentido del campo magnético que envuelve al conductor.* Esta regla, aplicada a la figura 3-2, obliga a que la corriente salga del conductor.

Suponiendo ahora que el conductor considerado esté situado dentro de un campo magnético uniforme, como ocurre en la figura 3-3, tendremos dos campos presentes, que tenderán a asociarse, sumán-

dose o restándose. Cuando los dos campos se encuentran en oposición, se restan, pero se suman cuando tiene el mismo sentido.

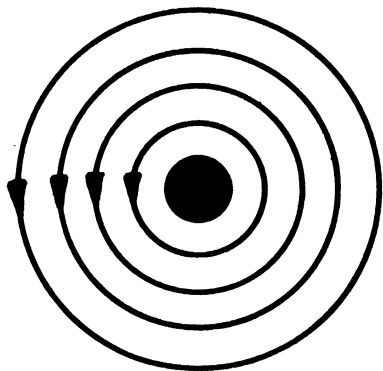
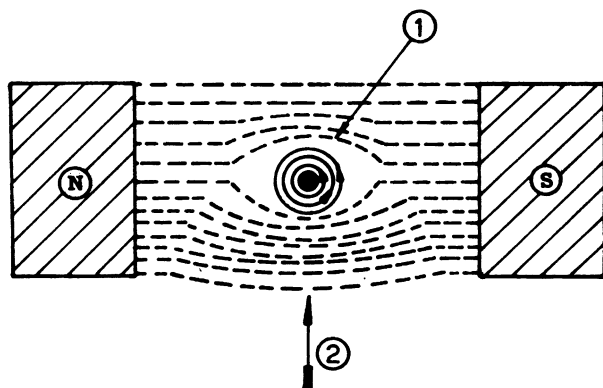


Fig. 3-2.—*Campo magnético que rodea un conductor cuando circula corriente.*

En la figura 3-3, la suma de los campos se efectúa en la parte inferior del conductor, provocando una concentración de líneas de fuerza en aquella zona. En la parte superior del conductor, por el contrario, los campos se restan, siendo reducido el número de líneas de fuerza. Esto hace que la intensidad del campo magnético debajo del conductor sea mayor que la que hay encima de él, dando origen a una fuerza que tiende a desplazar el conductor hacia arriba.



- 1 - Zona débil
2 - Dirección de reacción en el conductor.

Fig. 3-3.—*Interacción del campo magnético de un conductor, por el cual circula corriente, con el campo magnético de un imán.*

Lo que se acaba de describir es una consecuencia de la ley de Lenz, que asegura que *en todos los casos de inducción electromagnética, el sentido de la fuerza electromotriz inducida es tal que el campo magnético provocado por la corriente resultante tiende a oponerse al movimiento que da origen a la citada fuerza electromotriz*. Si se aplican las reglas de Fleming y del sacacorchos al conductor de la figura 3-3, veremos qué es exactamente lo que sucede.

Tratándose de un motor, la fuerza electromotriz de reacción o fuerza contraelectromotriz, que aparece en la armadura giratoria, se opone, por sus efectos, a la tensión aplicada a la máquina.

3.2. MOTOR ELEMENTAL DE CORRIENTE CONTINUA.

Como se ha dicho anteriormente, los principios que rigen el funcionamiento del generador y del motor son idénticos. El motor elemental, representado en la figura 3-4 también está constituido por una espira de conductor que gira entre los polos de un imán permanente.

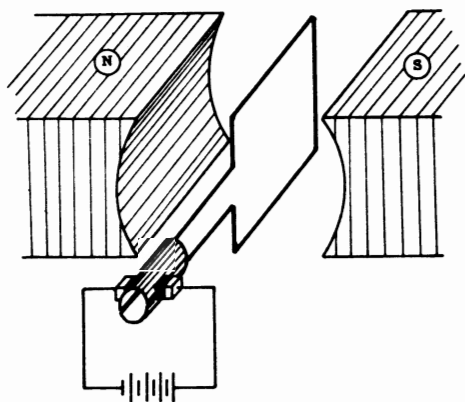


Fig. 3-4.—Motor elemental de corriente continua.

En las figuras 3-5, 3-6 y 3-7, nuestro motor elemental se representa en tres posiciones distintas, para mejor comprender su funcionamiento. En todas las figuras, el motor se ha representado en sección, visto de frente.

En la figura 3-5, la corriente que pasa por la espira hace que aparezca encima de ella un polo magnético norte y debajo un polo magnético sur. De esta forma, esos polos son atraídos por los polos de naturaleza opuesta del imán permanente y la espira gira en el sentido de las manecillas del reloj.

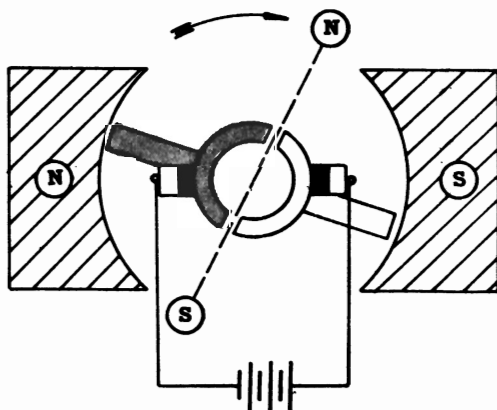


Fig. 3-5.—Funcionamiento del motor elemental.

En la figura 3-6, la espira ha realizado un giro de 90° en relación con la posición anterior, y, de esta forma, sus polos se encuentran frente a los del imán permanente. Pero ahora se observará que, debido a la acción del conmutador, que invierte el sentido de recorrido de la corriente por la espira, no es su polo sur el que está frente al norte del imán, sino el propio polo norte. De esta forma, debido a la repulsión entre los polos del mismo nombre, la espira continúa girando en el mismo sentido hasta alcanzar la posición representada en la figura 3-7.

En esta nueva posición de la espira, que equivale a una rotación de 180° en relación con la anterior, ya hubo una nueva conmutación y, como en el caso de la figura 3-6, los polos de la espira están frente a los polos del mismo nombre del imán, y aquélla continúa girando en el mismo sentido, permaneciendo así mientras haya una corriente circulando por ella.

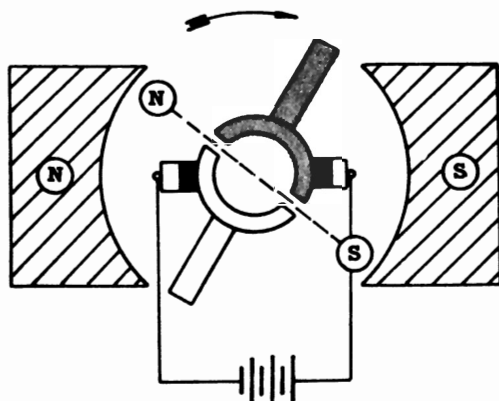


Fig. 3-6.—Motor elemental en una posición desplazada 90° en relación con el de la figura 3-5. Obsérvese que el conmutador invierte el sentido del recorrido de la corriente.

Es imprescindible comprender perfectamente el funcionamiento del motor fundamental, ya que éste constituye la base del estudio de todos los motores de corriente continua. A este efecto, es interesante recordar que la corriente que circula por la espira cambia de sentido en el momento exacto en que sus polos están frente a los polos de nombres contrarios del imán permanente. Si no se realiza la conmutación, o si se hace en un momento inoportuno, el motor se parará y los polos de signos contrarios del imán y de la espira quedarán enfrentados.

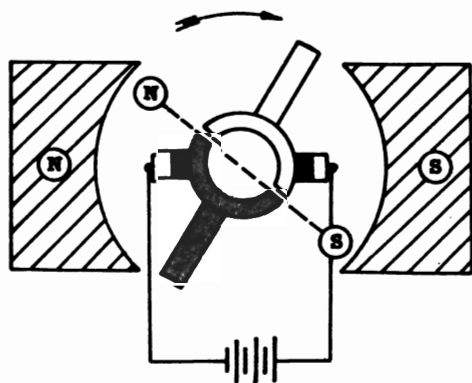


Fig. 3-7.—Obsérvese que en esta posición del motor elemental, la bobina está desplazada 180° en relación con la posición anterior, pero por la acción del conmutador su polo norte permanece frente al polo norte del imán.

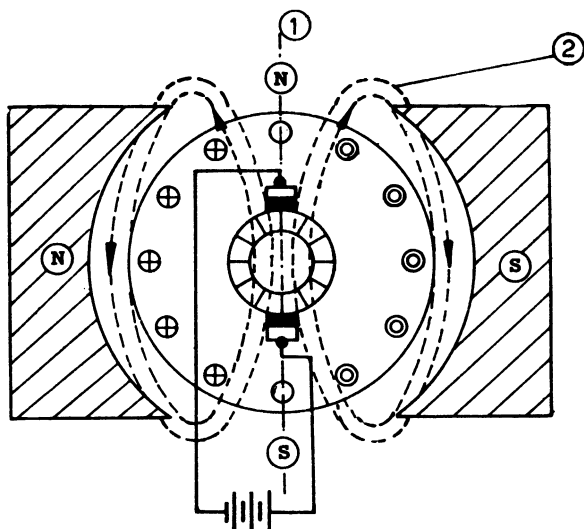


Fig. 3-8.—*Campo magnético del inducido.*

- 1 — Línea neutra.
2 — Campo del inducido.

En los motores reales, los inducidos están formados por bobinas múltiples, todas con el eje perpendicular al campo magnético producido por el estator. El flujo producido por la reacción del inducido se muestra en la figura 3-8, en la que, partiendo de la posición indicada, se puede considerar que el polo norte del imán es repelido por el polo norte del estator, y atraído por el polo sur. La atracción y la repulsión se realizan simultáneamente, ejerciendo sobre el inducido un par motor que le hace girar en el sentido de las agujas del reloj.

A causa del gran número de bobinas, se puede suponer que el campo del inducido está siempre presente y localizado en la posición indicada, lo que hace que haya siempre un par motor actuando sobre el inducido. La línea perpendicular al eje mecánico de la máquina, equidistante de los polos, se llama *línea neutra*, pues en ella no se ejerce ninguna influencia magnética.

3.3. REACCION DEL INDUCIDO.

Por lo que se ha visto anteriormente, el inducido está asociado a un campo magnético permanente debido a la constante circulación de la corriente de sus bobinas, campo que está envuelto por el producido por el estator. La acción conjunta de los dos campos produce una deformación del campo magnético principal, y como consecuencia de esta deformación, la línea neutra sufre un desplazamiento angular en sentido inverso al de rotación del inducido.

Observando la figura 3-3 vemos que la línea neutra, equidistante de los polos coincide con la recta que une las escobillas. En un motor real, no obstante, las escobillas no pueden estar dispuestas en la línea neutra teórica, pues de ser así se producirían chispazos entre las escobillas y el colector, por ser la conmutación imperfecta. Para evitar este inconveniente se recurre al artificio de desplazar las escobillas a la posición real de la línea neutra, como puede observarse en la figura 3-9.

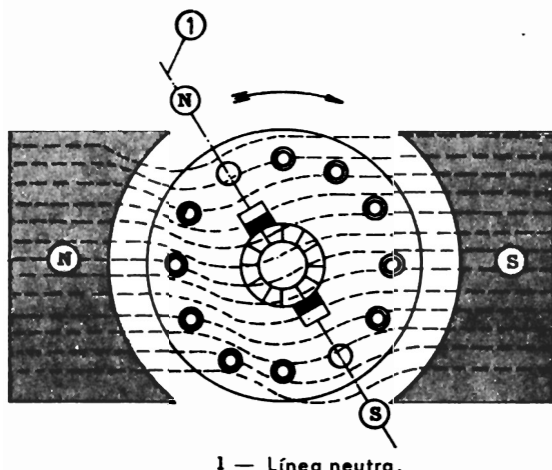


Fig. 3-9.—Reacción del inducido en los motores de corriente continua.

En algunas máquinas se neutraliza la reacción del inducido mediante el empleo de polos auxiliares, polos ranurados con bobinas compensadoras, etc. Una vez realizada la compensación, no será ne-

cesario ya el desplazamiento de las escobillas, pues la línea neutra vuelve a su posición teórica, y la no inducción de corriente en la bobina conmutada evita los chispazos.

3.4. FUERZA CONTRAELECTROMOTRIZ.

En un motor en funcionamiento también se observa una generación de corriente, pues los conductores de la armadura giratoria cortan el campo magnético uniforme del estator. Este fenómeno se ilustra en la figura 3-10, en la que para mayor facilidad de comprensión se ha representado un conductor que se desplaza de abajo arriba, pues la fuerza electromotriz aplicada está simbolizada por la flecha de línea continua.

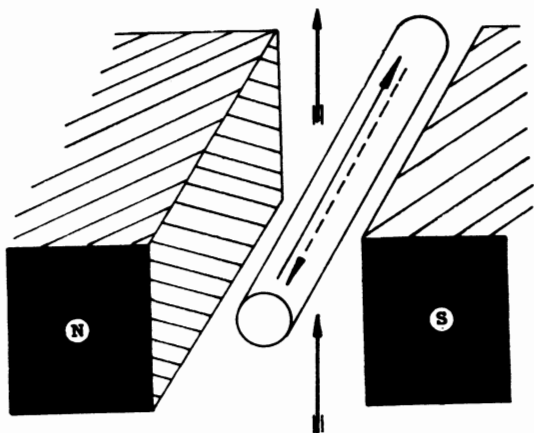


Fig. 3-10.—Representación de la fuerza contraelectromotriz en un conductor.

Obsérvese entonces que tenemos un conductor, recorrido por una corriente, que se desplaza en un campo magnético uniforme. Por lo que se ha afirmado anteriormente, es forzoso que aparezca una fuerza contraelectromotriz que se oponga a la f.e.m. aplicada. Esta f.e.m. está representada por la flecha de línea de trazos y el sentido indicado coincide con el que se determinaría si aplicáramos la regla de la mano izquierda para generadores, la cual dice lo siguiente: *colocando los dedos pulgar, índice y medio de la mano izquierda forman-*

do ángulos rectos entre sí, el primero apuntando en la dirección del movimiento del conductor, y el segundo en la dirección del flujo magnético, el dedo medio indicará el sentido de la fuerza electromotriz inducida en el conductor. Este sentido no es más que el sentido del flujo de corriente en el conductor provocado por la f.e.m. inducida.

La fuerza contraelectromotriz está siempre presente en un motor en funcionamiento, y, como en el caso de la f.e.m. inducida en los generadores, su valor es proporcional a la intensidad del campo magnético y a la velocidad con la que gira el motor. Así, la tensión efectiva existente en los bornes del inducido es la diferencia entre la tensión aplicada y la fuerza contraelectromotriz inducida.

Tratándose de un motor de corriente continua, podemos considerar la tensión efectiva en los bornes del inducido como proporcional a la corriente que por ella circula y a la resistencia del devanado (ley de Ohm). Luego para que circule en el inducido una corriente I_1 , siendo R_1 la resistencia del devanado, será necesario que exista en los bornes del inducido una tensión efectiva $I_1 \cdot R_1$. La corriente I_1 puede calcularse con la fórmula:

$$I_1 = \frac{E_a - E_c}{R_1},$$

donde:

E_a = fuerza electromotriz aplicada al motor;

E_c = fuerza contraelectromotriz inducida;

R_1 = resistencia del devanado.

En consecuencia, el valor de la fuerza contraelectromotriz puede determinarse para un régimen de funcionamiento dado, ya que la fuerza electromotriz aplicada y la resistencia del devanado son constantes, y la corriente I_1 puede medirse con un amperímetro.

Así:

$$E_c = E_a - I_1 \cdot R_1.$$

El concepto de fuerza contraelectromotriz es muy importante, no solamente en el aspecto teórico, sino también en el práctico. La

fuerza contraelectromotriz, por oponerse a la fuerza electromotriz aplicada, limita el flujo de corriente que circula en el inducido, lo que es fundamental para la realización práctica de los motores. Esto es debido a que la resistencia de los devanados es relativamente baja, variando de una fracción de ohmio a unos cuantos ohmios.

Si la resistencia óhmica de los devanados fuese el único factor limitador de la corriente del inducido, al aplicar al motor una tensión de 110 V, suponiendo el inducido con una resistencia de 2 Ω , por la ley de Ohm se tendría:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{110}{2} = 55 \text{ A.}$$

Considerando que para que el inducido tenga una resistencia de 2 Ω es preciso que los conductores de los devanados sean de poca sección, si por ellos circulase una corriente de tal valor, los devanados se quemarían inmediatamente. No obstante, como la fuerza contraelectromotriz es de valor casi igual al de la f.e.m. aplicada (100 V, por ejemplo), tendremos:

$$I = \frac{E_a - E_c}{R} = \frac{110 - 100}{2} = 5 \text{ A.}$$

La fuerza contraelectromotriz, como puede comprobarse, reduce de forma considerable la corriente que circula por el inducido, siendo el principal factor de limitación de esta corriente el que el motor esté en funcionamiento. No obstante, es preciso que se tenga en cuenta que en el momento en que arranca el motor, el valor de la fuerza contraelectromotriz es nulo, aumentando progresivamente a medida que el motor acelera. Por este motivo, los motores de corriente continua de mayor potencia están dotados de mandos de arranque que limitan la corriente del inducido durante la aceleración. Esos mandos pueden ser automáticos o manuales, consistiendo éstos en un reóstato conectado en serie con el inducido.

Sean automáticos o manuales, los mandos de arranque de los motores de c.c. operan de forma idéntica, esto es, reduciendo la resis-

tencia en serie con el inducido a medida que el motor se acelera. Cuando el motor alcanza la velocidad nominal, la resistencia en serie con el inducido puede cortocircuitarse.

Basándose en lo que se ha explicado, se deduce que el motor de c.c. puede quemarse por fallo mecánico si su rotor queda bloqueado, sin que se consiga desconectarlo inmediatamente. Teniendo presente esta posibilidad, los proyectistas de instalaciones de fuerza nunca prevén la conexión directa del motor a la red de alimentación, sino a través de dispositivos de protección, tales como relés térmicos, que actúan a modo de interruptores de alimentación, siempre que por cualquier motivo la corriente que circula por el inducido alcance límites peligrosos. Estas medidas de seguridad son absolutamente indispensables en todas las instalaciones de motores con potencia superior a 1 HP.

3.5. VELOCIDAD DEL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA.

Cuando sea necesario emplear un motor de c.c. para realizar un determinado trabajo, deberá tenerse en cuenta que cuanto más pesada sea la carga, esto es, cuanto mayor sea su par, mayor será la potencia requerida por el motor para funcionar con una determinada velocidad. La potencia desarrollada por el motor depende de la corriente que el inducido absorba de la red y, por esto, cuanto más pesada sea la carga, mayor será la absorción de corriente. Veamos: En el apartado 3.4 se ha visto que $E_c = E_a - I_1 \cdot R_1$. Haciendo una trasposición de términos se llega a la relación $E_a = E_c + I_1 \cdot R_1$, que nos asegura que la caída de tensión en el inducido del motor siempre se suma a la fuerza contraelectromotriz E_c , suma que es igual a la fuerza electromotriz aplicada E_a . Como E_a puede considerarse constante, la suma $E_c + I_1 \cdot R_1$ también lo será.

Una vez aclarado esto, vamos a ver lo que sucede cuando aumenta el par de la carga aplicada al motor. En estas condiciones, la velocidad disminuye, y lo mismo ocurre con el valor de la fuerza contraelectromotriz E_c . Como R_1 es constante, es obvio que, obedeciendo a la ecuación $E_a = E_c + I_1 \cdot R_1$, el valor de la corriente del inducido tiene que aumentar. Este aumento, no obstante, está limitado por las propias características de la máquina, y si la corriente sobrepasa

el valor máximo permisible en funcionamiento continuo, se quemarán los devanados del inducido.

La velocidad del motor de corriente continua no depende solamente de la carga, sino también de la intensidad de campo y de la tensión aplicada, pues estas magnitudes actúan sobre la velocidad en sentido opuesto; en cuanto un aumento de la tensión aplicada al motor incrementa su velocidad, el de la intensidad del campo la reduce. Por tanto, es posible controlar la velocidad del motor de corriente continua mediante la inclusión de reóstatos en los circuitos del inducido y del campo, como ilustra la figura 3-11.

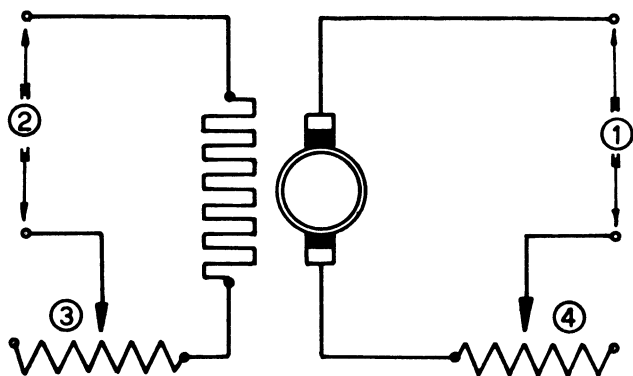


Fig. 3-11. — *Regulación de la velocidad en los motores de corriente continua.*

- 1 — Alimentación del inducido
- 2 — Alimentación del campo.
- 3 — Reóstato del campo.
- 4 — Reóstato del inducido.

Cuando se aumenta la resistencia en serie con el inducido, se reduce la tensión efectiva aplicada al motor, pues habrá una caída de tensión en la resistencia aumentada. A pesar de ello, este método para reducir la velocidad del motor, de su valor nominal a cero, no es económico, pues una parte de la potencia suministrada por la red se disipa en la resistencia en serie, disminuyendo en consecuencia la potencia efectiva del motor. Esto no causaría mayores problemas si el motor ya estuviera en régimen, accionando una carga inferior a la máxima permisible. No obstante, es muy inconveniente durante el arranque del motor que hasta podría no producirse, según el par de la carga.

Mientras que por el método de variación de la resistencia en serie con el inducido se consigue reducir la velocidad del motor de su valor nominal a cualquier otro hasta cero, mediante la reducción de la corriente del campo, y la consiguiente disminución del flujo magnético, se consigue teóricamente aumentar al infinito la velocidad de la máquina, pero en la práctica este aumento no puede sobrepasar un 10 por 100 por encima de la velocidad normal.

CUESTIONARIO

- 1) *¿Mediante qué regla puede determinarse el sentido de giro de una bobina en los motores de corriente continua?*
- 2) *Enúnciese la ley de Lenz para un conductor que corta un campo magnético.*
- 3) *¿A causa de qué fenómeno está también el inducido asociado a un campo magnético?*
- 4) *¿Cómo puede neutralizarse la reacción del inducido?*
- 5) *¿Cuál es el valor de la fuerza contraelectromotriz en el caso de los generadores?*

Tipos de motores de corriente continua

4.1. INTRODUCCION.

Como se ha dicho ya, no existe diferencia constitutiva entre los motores y los generadores de corriente continua. Un generador de corriente continua puede funcionar como motor, y, para ello, basta con que se le alimente con una fuente de corriente continua adecuada a sus características constructivas.

Por ejemplo, una dinamo o generador de c.c. de automóvil, que normalmente es capaz de suministrar 6 V a 20 A, funcionará como motor si en sus bornes de salida se le conecta una batería de 6 V con capacidad para 20 A.

Una vez establecido esto, pasamos a describir dos tipos de motores de corriente continua, como se hizo cuando se trató de los generadores de c.c., y como estos dos tipos de máquinas son tan semejantes, los motores también se clasifican como de excitación en derivación o «shunt», en serie y compuesto.

4.2. MOTORES EN DERIVACION.

En este tipo de motor, esquematizado en la figura 4-1, el campo está conectado directamente a la red de alimentación, en paralelo con el inducido. En estas condiciones, la intensidad del campo es

independiente de la corriente que circula por el inducido, y también de las características de la carga.

En serie con el inducido está conectada la llamada resistencia de arranque o resistencia de aceleración, R_a , cuya función es limitar la corriente del inducido al arrancar el motor. Como se sabe, la corriente requerida por el inducido en el arranque del motor es alta, considerando que la fuerza contraelectromotriz, que limita la corriente del inducido durante el funcionamiento de la máquina, no existe cuando ésta está parada. Por eso la resistencia R_a se mantiene en el circuito hasta que el motor alcanza una velocidad próxima a la nominal.

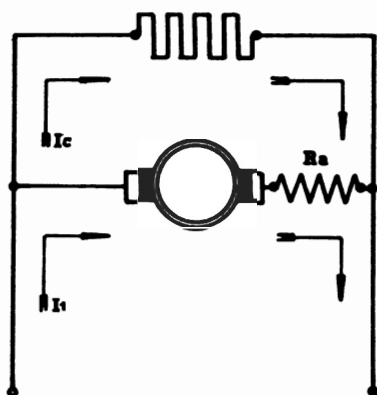


Fig. 4-1.—Motor de excitación en paralelo o en derivación.

La inclusión de la resistencia R_a en serie con el inducido, a pesar de contribuir a que no se quemen los devanados, reduce el par motor durante el arranque, consumiendo parte de la potencia suministrada por la red. Por eso, en cuanto el motor acelera hasta su velocidad de régimen, la resistencia R_a se debe poner en cortocircuito.

En los motores de corriente continua con excitación en derivación, si el potencial aplicado es constante, se desarrollará un par motor variable, con velocidad constante, de acuerdo con la variación de la carga. Por ello, esos motores se emplean con mayor frecuencia para accionar cargas constantemente variables.

Cuando el motor funciona en vacío, esto es, cuando no acciona ninguna carga, la única fuerza que ha de vencer es la fricción en los cojinetes y en las escobillas. La velocidad de la máquina, en tales con-

diciones, es evidentemente mayor que la existente después de la aplicación de una carga, si bien en los motores de corriente continua con excitación en derivación este descenso de velocidad es pequeño. Una reducción de la carga, por el contrario, produce un pequeño aumento de velocidad.

En resumen, los motores de corriente continua con excitación en derivación tienen una buena regulación de velocidad que, además, es mejor que la regulación de tensión de la misma máquina funcionando como generador. La figura 4-2 muestra el gráfico de variación de velocidad en función de la potencia requerida para accionar la carga.

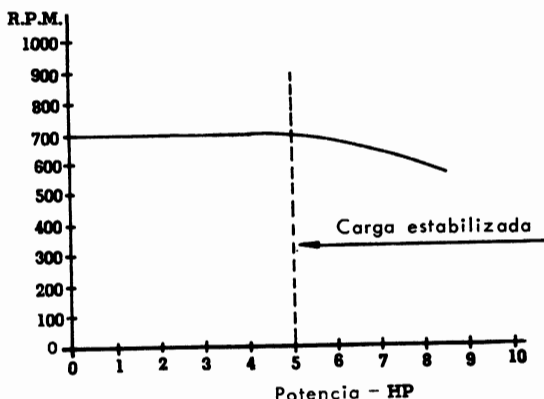


Fig. 4-2.—Variación de la velocidad en función de la carga impuesta a un motor de c.c. de excitación en paralelo.

4.3. MOTORES EN SERIE.

En los motores del tipo en serie, como el propio nombre lo indica, los arrollamientos del campo están conectados en serie con el inducido, como puede verse en la figura 4-3. Por los motivos ya explicados, tales motores no pueden funcionar en vacío, so pena de que se deterioren inmediatamente. Esto se debe a que si consideramos la tensión de alimentación constante, la corriente de inducido y de campo permanecerá constante, siempre que no haya variación en la carga.

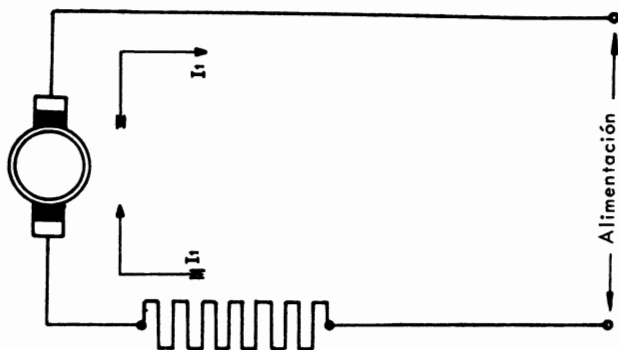


Fig. 4-3.—Motor de tipo en serie, en el cual se puede ver el campo conectado en serie con el inducido.

Suponiendo ahora que el motor trabaja en vacío, el inducido tenderá a aumentar su velocidad, creciendo proporcionalmente el valor de la fuerza contraelectromotriz inducida, E_c . Como la tensión de alimentación E_1 es la suma de E_c con la caída de tensión en el inducido $I_1 \cdot R$, si E_c aumenta habrá obligatoriamente una disminución del valor de I_1 .

Pero aquí la corriente I_1 no circula sólo por el inducido, sino también por el campo, y si disminuye, también se reduce el campo magnético del estator, provocando un nuevo aumento de la velocidad del rotor (inducido). Así se apreciará que este proceso de aumento de velocidad del motor en serie en vacío es acumulativo, culminando en su destrucción, pues ni los devanados del inducido arrollados en el interior de las ranuras del motor, ni las delgas del conmutador soportan las fuerzas centrífugas derivadas del disparo del motor, y se soltarán inmediatamente.

Por esta razón, volvemos a afirmar, el motor de corriente continua del tipo en serie nunca debe conectarse sin carga, la cual debe aplicarse directamente al eje de la máquina, a través de engranajes, y nunca a través de poleas y correas, ya que en la hipótesis de que la correa de transmisión se rompiera, no habría tiempo para desconectar el motor y éste se destruiría.

En la figura 4-4 se puede observar el gráfico de variación de velocidad del motor en serie, en función de la potencia requerida para accionar la carga, gráfico que muestra que la velocidad de este tipo de motor está muy sujeta a fluctuaciones acompañando a las varia-

ciones de la carga. Por este motivo, el motor del tipo en serie no se emplea normalmente cuando se desea una velocidad de accionamiento constante, no siendo en absoluto aconsejable que se utilice con cargas intermitentes, esto es, las que se aplican y retiran con el motor en funcionamiento.

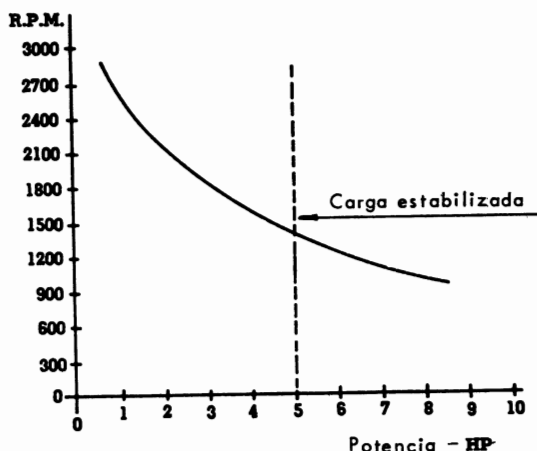


Fig. 44.—Variación de la velocidad en función de la carga impuesta a un motor de c.c. de tipo en serie.

El par que puede obtenerse en el eje de cualquier motor depende ante todo de las corrientes que circulan por el inducido y el campo. En el motor en serie, la corriente del inducido también pasa por el campo, de forma que cuando la velocidad del motor es baja, reduciéndose también el valor de la fuerza contraelectromotriz, circula una corriente de valor elevado por los devanados. Analizándose la condición extrema se saca la conclusión de que el par de arranque de un motor en serie es muy elevado.

Hay aplicaciones en las que es necesario un alto par de arranque para accionar la carga, como en las grúas, trenes y trolebuses, etc. En estos casos, y en otros de la misma naturaleza, el empleo del motor de corriente continua del tipo en serie está bastante difundido.

4.4. MOTOR COMPUESTO (Compound).

De la misma forma que los generadores de este tipo estudiados anteriormente, los motores compuestos poseen dos conjuntos de de-

vanado de campo, uno de ellos conectado en serie y el otro en paralelo con el inducido. Por eso reúne las características de los motores en derivación y las de los del tipo en serie, poseyendo un alto par de arranque y una velocidad razonablemente constante al accionar cargas variables.

Podemos dividir los motores compuestos en dos tipos principales: los que tienen el devanado en serie conectado de modo que refuerza el campo en derivación, y por eso se llaman *compuestos acumulativos*, y los que tienen conectado el devanado en serie invertido, de modo que producen un flujo contrario al del campo en derivación, que se llaman *compuestos diferenciales*.

En los motores compuestos acumulativos, cuyo esquema de conexiones se ilustra en la figura 4-5, la velocidad disminuye al aumentar la carga, pero con menos rapidez que en los motores con excitación en serie. En cuanto al par de arranque, es mucho más elevado que el de un motor con excitación en paralelo o en derivación, teniendo en cuenta la existencia de un campo en serie con el inducido.

En cuanto a la velocidad de la máquina en vacío, su comportamiento es diferente del descrito para los motores en serie, teniendo presente que cuando el motor tiende a acelerar, aumentando el valor de la fuerza contraelectromotriz, la corriente del inducido disminuye, haciendo que la mayor parte del flujo de excitación se deba al campo en paralelo. Así, en este aspecto, el motor compuesto acumulativo se comporta como un motor de excitación en paralelo.

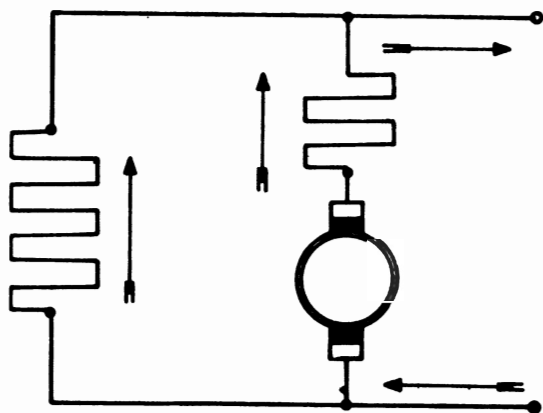


Fig. 4-5.—Motor compuesto acumulativo.

En el motor compuesto diferencial, cuyo esquema de conexiones se ilustra en la figura 4-6, la intensidad de campo y la corriente del inducido disminuyen al crecer la carga. Esto, evidentemente, tiende a provocar un aumento de velocidad, que, no obstante, es limitado, poseyendo este motor una velocidad prácticamente constante con la carga. Por desgracia, teniendo en cuenta la oposición de los flujos de los dos campos, el par de arranque de este motor es bajo, lo que limita su campo de aplicación.

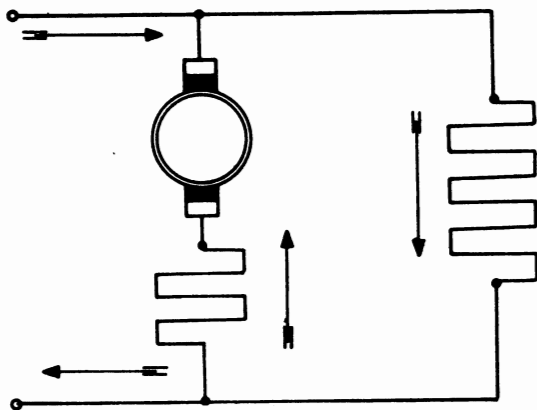


Fig. 4-6.—Motor compuesto diferencial.

4.5. RENDIMIENTO DE LOS MOTORES ELECTRICOS.

El rendimiento de cualquier máquina eléctrica se define como la relación entre la potencia de salida P_s y la de entrada P_e . En el caso de los motores de corriente continua, la potencia de entrada se expresa en vatios (W), y la de salida, en caballos de vapor (H. P.). A efectos de conversión de unidades, la relación entre ambas es la siguiente:

$$1 \text{ HP} = 746 \text{ W.}$$

El modo más usual de representar el rendimiento de un motor es en porcentajes, y teniendo en cuenta que toda máquina tiene pér-

didas (p), su rendimiento nunca alcanza el 100 por 100. Considerando válida la relación $P_s = P_e - p$, el rendimiento (η) de un motor se da como:

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_e - p}{P_e}$$

o en porcentaje:

$$\eta = \frac{P_e - p}{P_e} \times 100.$$

Las pérdidas existentes en un motor pueden agruparse en tres clases: en el cobre, en el hierro y pérdidas por fricción. Entre estas últimas podemos citar el roce en los cojinetes, que puede reducirse a un mínimo mediante el empleo de rodamientos o de cojinetes especiales, además de una buena lubricación periódica. Además de las mencionadas, tenemos las pérdidas debidas a la resistencia impuesta por el aire al movimiento del rotor y el roce de las escobillas contra el colector, razón por la cual las delgas deben estar siempre limpias y pulidas.

Las pérdidas en el cobre se deben a la resistencia impuesta por los devanados de campo y de inducido, siendo proporcional a la resistencia y al cuadrado de la corriente que circula por cada uno de los devanados. Las pérdidas en el hierro son producidas por la histéresis y las corrientes parásitas del inducido que, como ya dijimos en otra sección, pueden reducirse mediante el empleo de núcleos laminados.

Si, por ejemplo, medimos con un vatímetro la potencia de entrada de un motor, y ésta es de 3.000 W, y con un dinamómetro la potencia mecánica de salida, y ésta es 1,7 HP, el rendimiento de la máquina será:

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} \times 100 = \frac{1,7 \times 746}{3.000} \times 100 = 42,27 \text{ por } 100.$$

Conociendo el rendimiento de un motor y la potencia de entrada,

podemos calcular las pérdidas por una simple trasposición algebraica de los términos de la fórmula de rendimiento. Así:

$$\eta = \frac{P_e - p}{P_e} \times 100,$$

tendremos:

$$(P_e - p) \times 100 = \eta \times P_e,$$

ó

$$100 p = 100 P_e - \eta \times P_e,$$

de donde:

$$p = \frac{P_e (100 - \eta)}{100}.$$

Aplicando a esta fórmula los valores del ejemplo anterior, encontramos:

$$p = \frac{3.000 (100 - 42,27)}{100} = 1.722 \text{ W.}$$

CUESTIONARIO

- 1) *¿Cuál es la condición, en los motores de tipo en serie, para que la corriente del inducido permanezca constante?*
- 2) *¿Cuál es el curso de la corriente en el interior de un motor del tipo en serie?*
- 3) *¿Cómo pueden clasificarse los motores compuestos?*
- 4) *¿Cuál es el rendimiento de un aparato eléctrico?*
- 5) *¿A cuántos HP corresponden 1.492 W.?*
- 6) *¿A cuántos vatios corresponden 52 HP?*

5

Control de arranque y velocidad en motores de corriente continua

5.1. INTRODUCCION

En la mayoría de las aplicaciones, los motores están conectados directamente a una línea de alimentación, funcionando de acuerdo a sus características conjugadas de velocidad, viniendo determinado el punto de trabajo por la carga mecánica. A su vez, en otras muchas aplicaciones, los motores están provistos de equipos de control, mediante los cuales se pueden modificar sus características, pudiendo alterarse las condiciones de funcionamiento para poderse adoptar a exigencias particulares de carga mecánica.

Cuando estudiamos la fuerza contra-electromotriz (f.c.e.m.), dijimos que la limitaba la corriente del inducido a valores razonables. No obstante, cuando un motor entra en funcionamiento la f.c.e.m. es muy baja, concediendo un margen para que la corriente sea más bien elevada. En consecuencia, esto no es bueno, sobre todo teniendo en cuenta que normalmente las bobinas de un inducido no están preparadas para soportar corrientes elevadas. Por esto, es imprescindible que la corriente de partida esté limitada, evitando con ello que se queme el inducido.

Hay dos modernos dispositivos constituidos por sistemas basados en la electrónica de potencia (los cuales trataremos en este capítulo) que se utilizan actualmente para el arranque, aceleración y control

de velocidad de los motores de c.c. Trataremos de quéllos que se encuentran en período de sustitución y que forman parte de instalaciones y sistemas en funcionamiento.

5.2. DISPOSITIVOS DE ARRANQUE NORMAL

Supongamos que tenemos un motor de 110 v. como se indica en la fig 5.1. Con una resistencia en el inducido de $0,3 \Omega$ y una corriente a plena carga de 30 amperios, como valores suministrados por el fabricante.

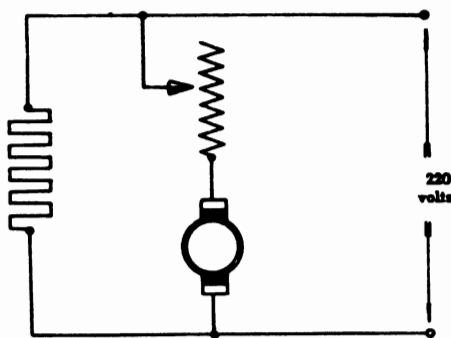


Fig. 5-1.—Reostato de inicio conectado en serie con el inducido.

El motor tiene una excitación en paralelo o derivación y en caso de que no haya ninguna resistencia en el arranque, la corriente que circulará por el inducido cuando se aplica la alimentación será:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{110}{0,3} = 366 \text{ A}$$

Esta corriente es mucho más elevada que la que puede soportar el bobinado; por ello, debemos limitar su valor al recomendado por el fabricante, que normalmente suele ser el 125 ó 150% de la corriente nominal a plena carga. En nuestro ejemplo, supongamos que la corriente de arranque debe de limitarse a un 130% de la corriente nominal a plena carga, esto es, a 39 amperios. Luego el valor de la resistencia de arranque que llamaremos R_s , deberá ser:

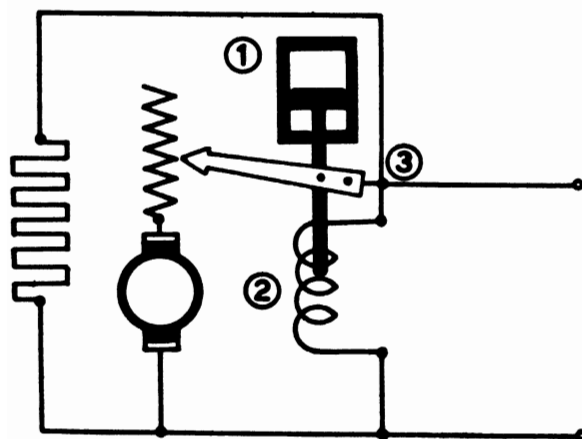
$$R_s = \frac{E_a - I'_l R_l}{I'_l} = \frac{110 - (39 \times 0,3)}{39} \cong 2,5 \, \Omega$$

Esto quiere decir que si conectamos una resistencia de 2,5 Ω en serie con el inducido en el instante del arranque del motor, la corriente del inducido no será mayor de 39 A. Estas resistencias limitadoras son de tipo variable (reostatos, potenciómetros, etc.) o de valor fijo, siendo eliminados del circuito paulatinamente a medida que el motor acelera.

5.3. DISPOSITIVOS AUTOMATICOS.

En caso de que los motores se encuentren a una cierta distancia de los paneles de mando o cuando se utilizan unidades de potencia grandes, es conveniente usar siempre dispositivos automáticos, siendo los más utilizados los motores de potencia pequeña.

La tecnología ha desarrollado una serie de dispositivos automáticos de distintos tipos, que estudiamos a continuación. El primero de ellos se puede ver en la fig. 5-2, el cuál llamaremos dispositivo por con-



- 1—Pistón hidráulico
- 2—Solenoide del relé de arranque
- 3—Cursor de resistencia de arranque

Fig. 5-2.—Dispositivo automático por control de tiempo.

trol de tiempo. Introduce una resistencia en serie con el inducido, resistencia que se reduce progresivamente hasta cero en un tiempo predeterminado, sin tener en cuenta la carga del motor.

El funcionamiento del dispositivo de la fig. 5-2, se basa en el uso de un relé temporizado. Este relé, consiste esencialmente en un solenoide cuyo núcleo no penetra en la bobina inmediatamente al circular la corriente por el arrollamiento, teniendo en cuenta que sus extremos están acoplados a un pistón hidráulico.

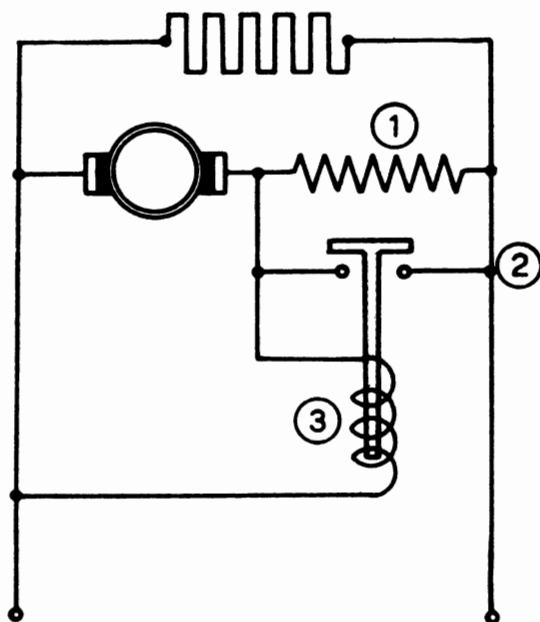
Cuando se aplica energía al relé, el líquido existente en el pistón pasa a uno u otro lado del émbolo a través de una válvula existente en el mismo. Como el cursor del reostato se encuentra articulado con el núcleo del solenoide, el movimiento de éste se transmite a aquél, haciendo variar la resistencia en serie con el inducido.

Antes de poner el motor en funcionamiento, el émbolo del pistón se debe de colocar totalmente hacia la derecha, de modo de que la resistencia en serie con el inducido sera máxima. Al aplicar tensión al motor, comprobamos que circulará una corriente, tanto por el campo como por el inducido y la bobina del relé, que comenzará a atraer al núcleo. El émbolo del pistón, entonces, comienza a desplazarse lentamente hacia la izquierda hasta que el émbolo recorra todo el cilindro. En este instante, el núcleo del relé estará totalmente introducido en la bobina y la resistencia de partida (que será máxima en el instante de funcionamiento del motor) se habrá reducido a cero.

El valor de la variación de velocidad del motor durante el tiempo de funcionamiento, depende por tanto de la velocidad de trasvase del líquido a través de la válvula existente en el émbolo del pistón. En la mayoría de los casos, esta velocidad puede ser regulada variando con un tornillo el ajuste del diámetro de la válvula por la que circula el líquido en el émbolo.

Las principales ventajas de este dispositivo son su simplicidad y bajo costo. No obstante, tenga en cuenta que no existe ninguna relación entre el valor de la carga y la variación de velocidad, o en el tiempo que el motor tarda en adquirir su velocidad nominal cuando pasa de vacío a una carga permisible.

Otro sistema del dispositivo es el que se indica en la fig. 5-3. En él, la bobina del relé actúa sobre los contactos de la resistencia de partida colocada en paralelo con el inducido, de forma que cuando se co-



- 1—Resistencia de arranque
- 2—Contactos de resistencia de arranque
- 3—Relé de arranque

Fig. 5-3.—Dispositivo automático basado en fuerza electromotriz (f.c.e.m.) del inducido.

necta el motor al relé permanece abierto, ya que no hay suficiente tensión en el inducido para accionarlo.

A medida que el motor gana velocidad, la f.c.e.m. inducida crece, hasta llegar a un valor suficiente para poder accionar el relé que, entonces, cortocircuita la resistencia conectando el inducido a la tensión total de alimentación. Cuando se trata de motores de gran potencia, la resistencia de partida está dividida en distintas secciones, las cuales se van cortocircuitando progresivamente por medio de relés. De este modo, el motor adquiere su velocidad nominal sin pasar por aceleraciones bruscas que podrían repercutir en variaciones de corriente que se desarrollarían sobre la resistencia.

La ventaja principal de este dispositivo, estriba en que no es necesario tiempo de permanencia de la resistencia de partida en serie con el inducido en función de la carga del motor. Como desventaja, pode-

mos citar su sensibilidad a las variaciones de la tensión de líneas. Cuando esta tensión aumenta, el relé actuará, cortocircuitando la resistencia antes de que la f.c.e.m. haya adquirido un valor de seguridad. Este inconveniente, puede ser controlado utilizando dispositivos como limitadores de corriente en paralelo, donde la corriente de línea recorre en su totalidad la bobina del relé.

5.4. CONTROL DE VELOCIDAD EN MOTORES DE C.C.

Los motores de c.c. son fácilmente controlables. Se puede variar su velocidad actuando sobre el campo mediante accionadores.

El ajuste más común de la velocidad de un motor es conjugando su aceleración, la cuál también puede ser controlada. Un equipo de control moderno consiste en relés, contactores, componentes magnéticos y dispositivos de estado sólido, tales como diodos, tiristores o transistores. La combinación en el motor de todo este equipo de control se llama sistema de accionamiento.

No hay comparación entre los distintos sistemas de accionamiento. Para expresar su función en valores numéricos, es preciso utilizar una terminología que sea estudiada en la industria. Definiremos los términos principales del siguiente modo:

Velocidad de base: La velocidad de base es la velocidad nominal del motor, también conocida como velocidad de placa (una placa que suele llevar el motor en su carcasa donde se indican las características dadas por el fabricante del mismo). En un motor de c.c. paralelo, la velocidad del mismo depende de la tensión nominal y de la corriente de campo. El motor se puede actuar por encima o por debajo de la velocidad base.

Regulación de velocidad: La regulación se refiere generalmente a la capacidad del sistema de mantener la velocidad pre-ajustada sobre cargas variables.

La regulación porcentual de velocidad se puede utilizar dada una relación de velocidad base del motor. A una velocidad más baja, el motor puede tener la misma caída de velocidad, pero la regulación porcentual de la misma será más alta.

Franja de velocidades: La franja de velocidades es la comprendida entre la velocidad máxima y mínima del sistema. Esta franja también se puede dar cuando la carga del motor viene especificada, por ejemplo, en vacío o a plena carga. La limitación de esta franja de velocidades puede ser inherente con el equipo de control o puede depender de la capacidad de trabajo del mismo en bajas velocidades, como una posibilidad de no destruirse en altas velocidades.

Límites de conjugación: En el equipo de control se incorporan circuitos para limitar y conjugar el estado del motor durante los periodos de aceleración o sobrecarga. Los objetivos son numerosos: para obtener aceleraciones controladas en cargas de alta inercia; para proteger el motor y equipo de control en una sobrecorriente y para prevenir que el sistema no opere en regiones de operación inestables.

Accionamiento de potencia mecánica constante: El sistema tiene la capacidad inherente de suplir una potencia mecánica constante (relación/velocidad) sobre una franja dada de velocidades. Una relación más alta en velocidades más bajas determina generalmente el tamaño del motor y el equipo de control. Este tipo de accionamiento viene dado por las variaciones de velocidad y por el campo.

Accionamiento de relación constante: El sistema tiene la capacidad inherente de suplir una relación específica sobre la franja de velocidades. En este tipo, viene dada la variación de velocidad en la carcasa.

Continuando con lo establecido en cuanto a lo explicado para dispositivos de partida y sistemas también utilizados, podemos determinar matemáticamente la velocidad de un motor de c.c. mediante la fórmula:

$$n = \frac{E_c \times 10^8 \times P_l}{\phi \times Z \times p}$$

E_c es la f.c.e.m. inducida.

P_l el número de circuitos en paralelo entre los terminales del inducido.

Z el número de conductores en el inducido.

ϕ el flujo por polo, y

p el número de polos por campo.

En esta ecuación, P_l , Z y p son valores constantes para cada motor, de modo que podemos decir que:

$$\frac{P_l \times 10^8}{Z \times p} = K$$

donde k es una constante del motor. Asimismo, la velocidad del inducido viene dada por la expresión:

$$n = \frac{K \times E_c}{\phi}$$

El valor E_c normalmente no es conocido, pero sí la tensión aplicada E_a . Como $E_c = E_a - I_a R_l$, tendremos que para un motor con excitación en paralelo:

$$n = \frac{K (E_a - I_a R_l)}{\phi}$$

ecuación que nos confirma que la velocidad crece con la tensión aplicada E_a y con una reducción del flujo por polo ϕ . En la variación de estas dos variables deben de basarse, por tanto, los controles de velocidad para motores de c.c., los cuales pasamos a estudiar con mayores detalles.

5.5. CONTROL DE VELOCIDAD CON RESISTENCIA EN SERIE CON EL INDUCIDO.

En la fig. 5-4, el lector puede observar el circuito de un motor de excitación en paralelo con una resistencia variable (reostato) conectada en serie con el inducido. En este circuito se va a variar la corriente que crea el campo. Considerando la tensión de alimentación constante, el flujo ϕ también lo será. Asimismo, como:

$$n = \frac{K E_c}{\phi}$$

podemos hacer $\frac{K}{\phi} = K$ pasando a ser la expresión de la velocidad del inducido:

$$n = k E_c$$

Considerando ahora el circuito de la fig. 5-4, la caída de tensión en el bobinado del inducido y del reostato va a sumarse, teniendo entonces:

$$E_c = E_a - I_a (R_l + R_s)$$

donde R_s es la resistencia en el reostato en serie.

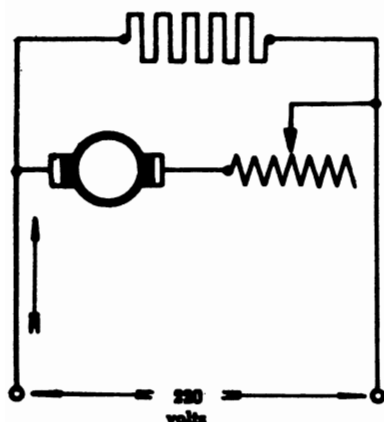


Fig. 5-4.—Control de velocidad mediante variación de resistencia en serie con el inducido.

A partir de esta ecuación, es fácil calcular el valor de R_s para que el motor gire a una velocidad n cualquiera, desde cero hasta la nominal.

Asimismo,

$$R_s = \frac{K (E_a - I_a R_l) - n}{K I_a}$$

Para la mejor comprensión de este proceso, recurramos a un ejemplo. Podemos tener un motor con las siguientes características: $k = 15$, $E_a = 220V$., $I_a = 6A$. y R_l (Resistencia del inducido) = $0,256 \Omega$.

Cuando no existe ninguna resistencia en serie con el inducido, su velocidad será:

$$\begin{aligned}
 n &= k [Ea - I_a (R_l + R_s)] = \\
 &= 15 [220 - 6 (0,256 + 0)] = \\
 &= 3.280 \text{ r.p.m.}
 \end{aligned}$$

Si quisiéramos reducir esta velocidad, p.e. a 1.500 r.p.m., debemos conectar en serie con el inducido una resistencia cuyo valor se puede calcular mediante la ecuación:

$$\begin{aligned}
 R_s &= \frac{k (Ea - I_a R_l) - n}{K I_a} = \\
 &= \frac{15 (220 - 6 \times 0,256) - 1.500}{15 \times 6} = \\
 &= 16,4 \, \Omega
 \end{aligned}$$

es decir, el valor de R_s será: 16,4 Ω .

Si deseamos estabilizar el funcionamiento del motor en 1.500 r.p.m., podemos utilizar entonces una resistencia de 16,4 Ω . Pero si lo que pretendemos es variar su velocidad entre 1.500 y 3.280 r.p.m., en lugar de una resistencia fija utilizaremos una resistencia variable o reostato de ese mismo valor. En cualquier caso, debemos de tener en cuenta que el rendimiento del motor cuando trabaja con velocidades bajas será bastante reducido, por lo que este tipo de control no será el indicado para motores que deban de funcionar durante largos periodos en estas condiciones.

5.6. CONTROL DE VELOCIDAD CON RESISTENCIA EN SERIE CON EL CAMPO

Cuando la variación de velocidad del motor se realice por medio de un reostato colocado en serie con el campo, la tensión de línea aplicada al inducido y la corriente de campo vendrá ajustada por el reostato, como podemos ver en la fig. 5-5. Este tipo de control, como ya se vio anteriormente, no permite una reducción de velocidad de la má-

quina por debajo de su valor nominal, pero sí un aumento, ya que cualquier reducción del valor de I_f de la corriente de campo provocada por la inducción del reostato, acarrea una reducción del flujo Φ . Como la velocidad del motor viene dada por

$$n = \frac{k E_c}{\Phi}$$

toda reducción de flujo corresponderá con un aumento de velocidad.

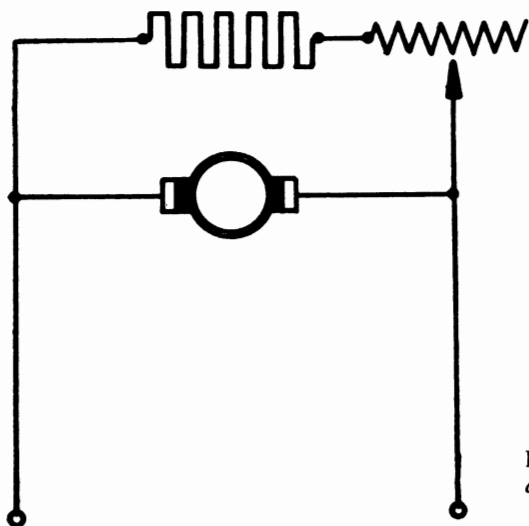


Fig. 5-5.—Control de velocidad mediante variación de resistencia en serie con el campo.

Con éste método, es posible aumentar la velocidad del motor desde su valor nominal hasta el infinito, por lo menos teóricamente, haciendo aproximarse a la intensidad de campo cada vez más a su valor de cero. No obstante, existe un límite máximo impuesto por el magnetismo remanente, ya que en la práctica, no se debe de aumentar la velocidad por encima del 70% de la velocidad nominal, salvo que por cualquier circunstancia se realice una conmutación imperfecta. Hay que tener en cuenta que en estas circunstancias se producirá un calentamiento del motor, y que la mecánica del mismo lo va a limitar mucho.

5.7. SISTEMAS MODERNOS PARA ARRANQUE, ACELERACION Y CONTROL DE VELOCIDAD

Los sistemas utilizados para el arranque, aceleración y control de velocidad en los motores de corriente continua están basados en la electrónica de potencia.

Son equipos llamados convertidores electrónicos de potencia, dotados de componentes de estado sólido, tales como tiristores, los cuales conforman circuitos electrónicos de control.

El tiristor es un dispositivo de estado sólido con tres terminales, el cuál puede conducir la corriente desde uno de sus terminales (ánodo) hasta otro (cátodo) dependiendo de la señal o tensión aplicada al tercer terminal llamado "puerta". El tiristor (también llamado SCR), es utilizado para obtener tensiones continuas controladas a partir de una red de alimentación de c.a.

Su modo de funcionamiento básico es siempre a partir de una fuente de tensión fijo, obteniendo en su salida una tensión continua variable, que en consecuencia, va a permitir variar la velocidad de un motor de corriente continua.

Cuando la fuente fija es una red de c.a., ya sea monofásica o trifásica, tendremos un convertidor CA-CC.

Este sistema es el que se utiliza comunmente en la industria para el accionamiento de motores de c.c.

Cuando la fuente fija es una línea de c.c. o una batería, tendremos un convertidor CC-CC, sistema que se utiliza normalmente en sistemas de tracción eléctrica, como en un trolebús, metro, tren, etc. o en vehículos de tracción eléctrica a base de baterías.

5.7.1. Convertidores ca-cc

El tiristor es un semiconductor que sólo conduce una corriente cuando se aplica un impulso de tensión a su puerta. Esta corriente sólo cesa cuando la propia corriente pasa por cero o cuando se aplica a los terminales del tiristor una tensión inversa que fuerza y bloquea su corriente. Asimismo, si observamos el montaje de la fig. 5-6, correspondiente a un puente de tiristores trifásico, dependiendo del ins-

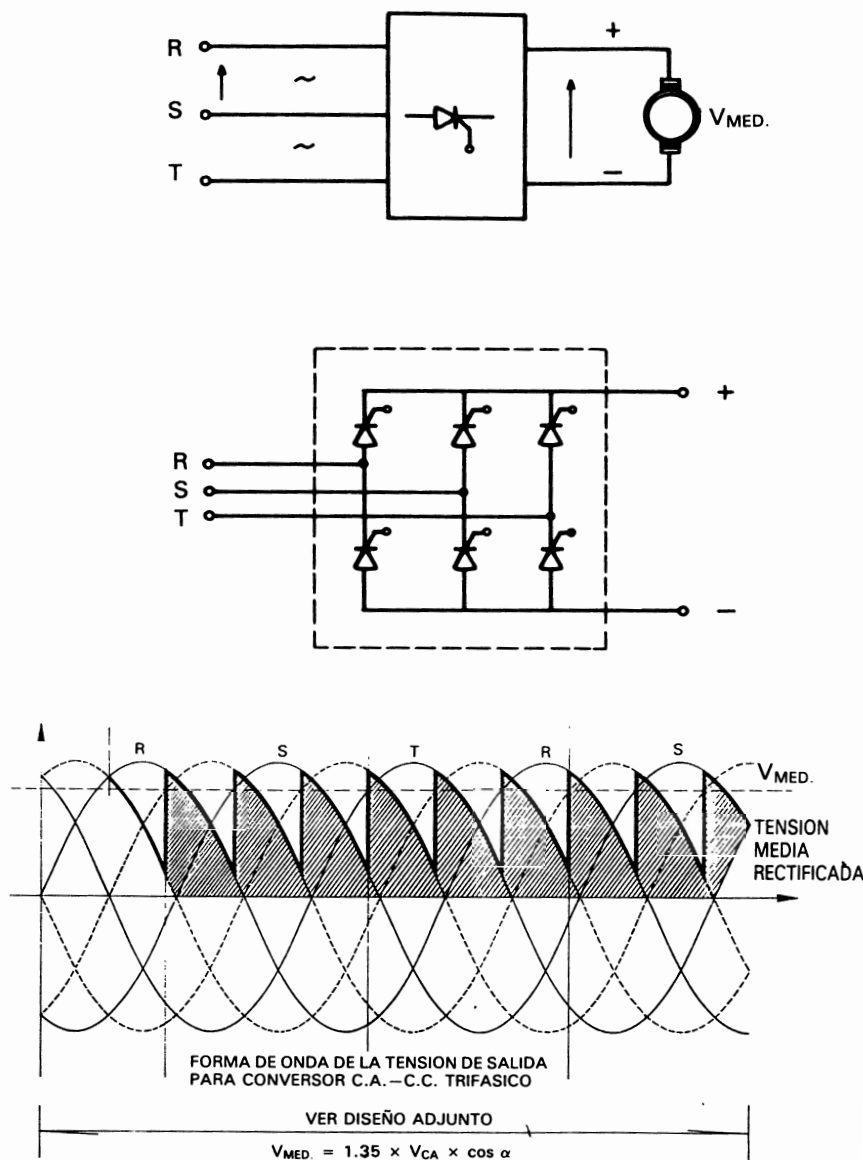


Fig. 5-6.

tante en que la sinusoide de la señal de red actúe sobre la puerta del tiristor, se disparará el circuito de control obteniendo una tensión media rectificada diferente.

En el caso monofásico, fig. 5-7, es más fácil de observar su funcionamiento.

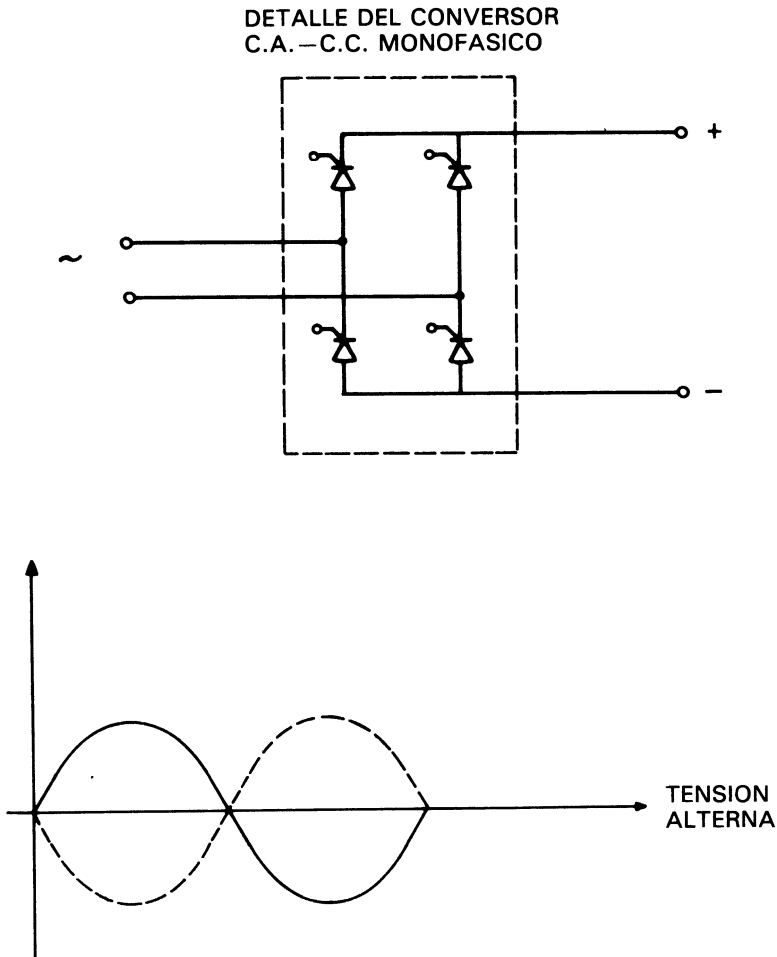


Fig. 5-7.

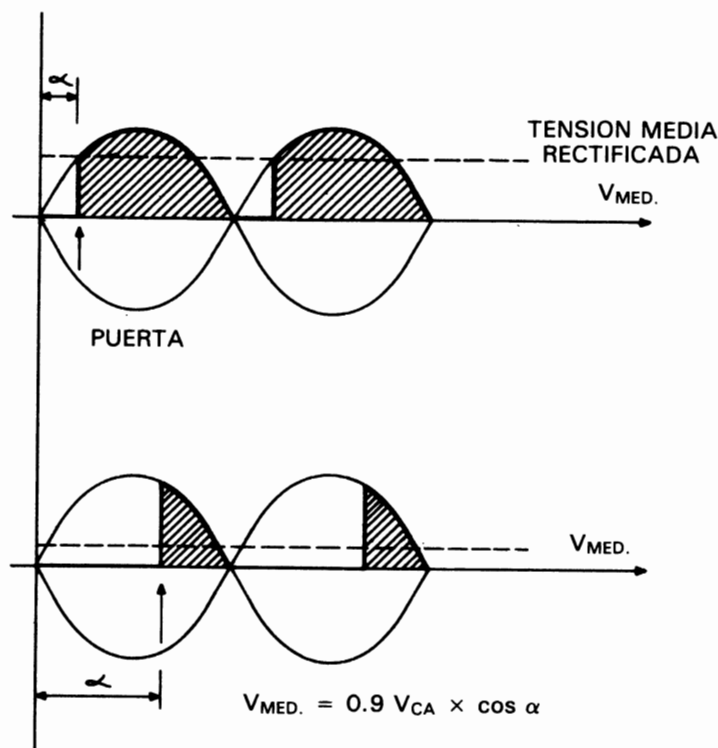


Fig. 5-7. (continuación).

Este tipo de control de tensión, en el que el impulso aplicado a la puerta es alterado en cada instante a lo largo de la senoide de referencia, se llama control de ángulo de fase.

5.7.2. Conversor cc-cc

En este caso (fig. 5-8), como la fuente es una c.c., el circuito de control se altera en relación al tiempo en que el tiristor conduce, o al tiempo en que está bloqueado.

Por ello, el modo más común de controlar la velocidad con un conversor a semiconductores es aquél que regula la velocidad con limitación de la corriente máxima. Fig. 5-9.

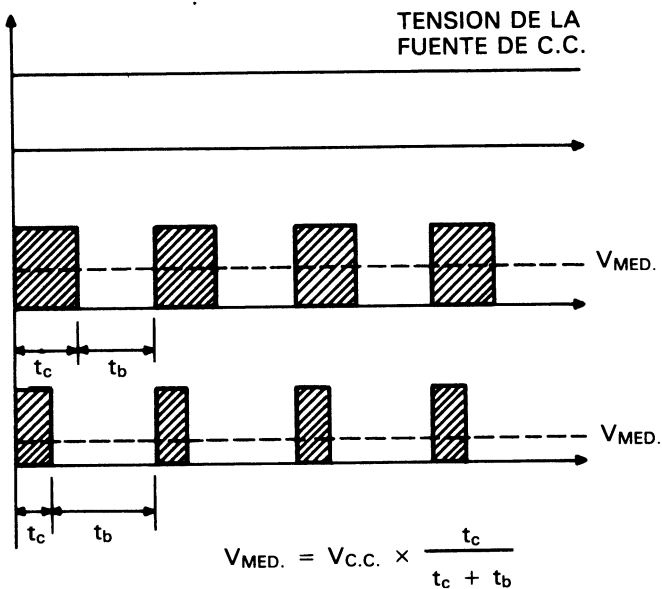
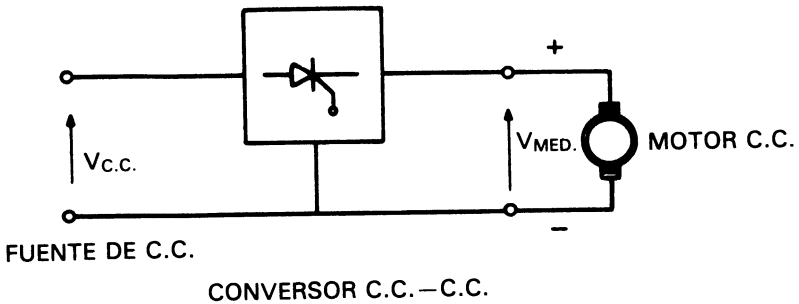


Fig. 5-8.

El motor es alimentado por un convertor cuyo control de tensión se realiza mediante el circuito de disparo. Este circuito controla el ángulo de dos impulsos de puerta, obedeciendo a la señal el regulador de corriente y el de velocidad.

La realimentación de velocidad se realiza mediante un tacómetro, el cuál suministra una corriente dependiente de la señal que proviene de un "shunt" (derivador) del motor.

El funcionamiento se realiza de la siguiente manera. Fig. 5-9.

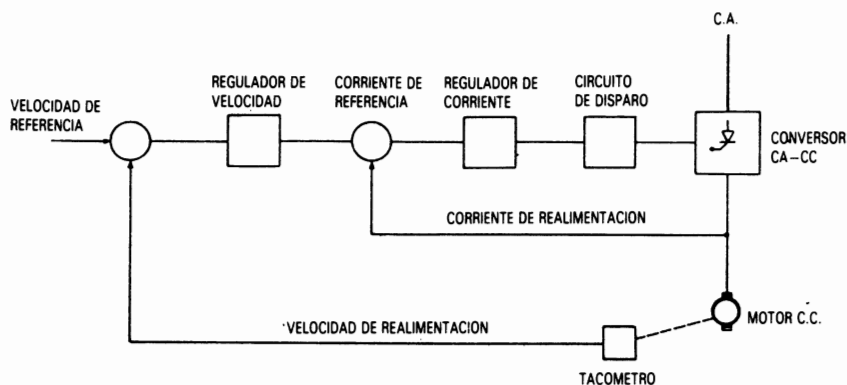


Fig. 5-9.

- Mediante la referencia de velocidad (puede ser un potenciómetro), el operador escoge la velocidad de trabajo deseada para el motor.
- Si el motor está parado, el regulador de velocidad emite una señal para el regulador de corriente, solicitando que sea aumentada la corriente del motor.
- Entonces, el regulador del motor alimenta el circuito de disparo, haciendo que los tiristores del convertidor CA-CC conduzcan, comenzando a su vez a ser aplicada corriente al motor.

Esta corriente aumenta hasta un valor pre-establecido para una referencia de corriente, permaneciendo en este valor, el cuál puede ser el de la corriente nominal (o de 1,5 a 2 veces la nominal).

- Cuando la velocidad medida por el tacómetro alcanza el valor pre-establecido, el regulador de velocidad retira la señal de sa-

- Cuando la velocidad medida por el tacómetro alcanza el valor pre-establecido, el regulador de velocidad retira la señal de salida, obligando al regulador de corriente a suprimir los impulsos y a disminuir la corriente del motor, el cuál deja de acelerar manteniendo a su vez la velocidad constante, viniendo la corriente definida por la carga del motor.
- El sistema queda asimismo estabilizado, con los reguladores corrigiendo constantemente la velocidad y la corriente a fin de mantener la velocidad constante, independientemente de las variaciones de carga en el eje del motor o en la tensión de red.

Es importante hacer notar, que con los convertidores electrónicos no sólo se consigue realizar un control de velocidad con bastante precisión, sino lograr también arrancadas extremadamente suaves y controladas. El rendimiento eléctrico es elevado, ya que no existen circuitos con reostatos que causan pérdidas eléctricas ni sistemas que originarían costos de instalación y mantenimiento.

6

Motores eléctricos de corriente alterna

6.1. INTRODUCCION

En la actualidad, los motores eléctricos de corriente alterna se emplean mucho más que los de corriente continua. Muchas son las razones para ello, siendo una de las principales el que las compañías distribuidoras de energía eléctrica sólo suministran corriente alterna a los consumidores. Además, los motores de c.a. son de construcción más simple, prescindiendo, en la gran mayoría de los casos, de colector y escobillas y, por tanto, precisan menos mantenimiento.

Salvo en casos especiales, para la misma potencia es mucho más económico utilizar motores de corriente alterna, que, además, pueden llegar incluso a tener una vida útil más larga.

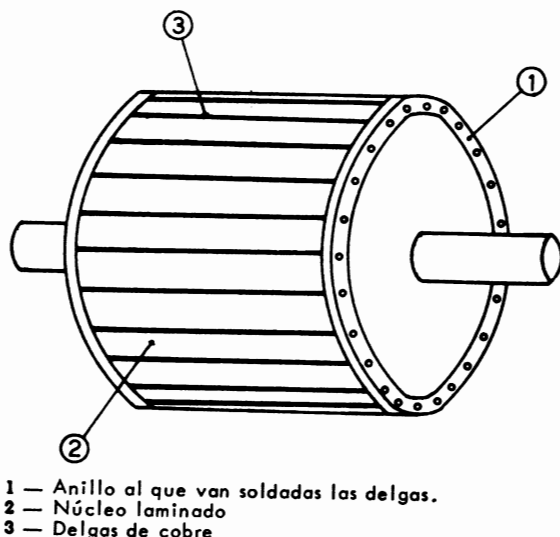
Vamos, pues, a estudiar dichos motores partiendo de la premisa de que ya se conocen los principios fundamentales de la corriente alterna.

Al estudiar el motor de corriente continua vimos que el movimiento del rotor lo producía la acción conjunta de dos campos magnéticos: el del estator y el del inducido. En los motores de corriente alterna, la razón del movimiento es la misma, pero hay una diferencia fundamental: la corriente de red, que es la corriente del estator, no circula por el rotor, que está aislado eléctricamente de las demás partes de la máquina.

Tampoco podemos decir que el motor de corriente alterna tiene

siempre el inducido bobinado, como ocurría en los motores de corriente continua. En la figura 6-1 se muestra un rotor típico de motor de corriente alterna, en el que vemos que la periferia del núcleo cilíndrico, formado por chapas prensadas, está atravesada longitudinalmente por una delgas de bronce, cobre o aluminio, cuyos extremos están soldados a dos anillos de latón, uno anterior y otro posterior. Este motor, por la configuración de su inducido, se denomina motor de tipo de jaula, y es por estas delgas de cobre, bronce o aluminio, por donde circula la corriente que el campo magnético del estator induce en el rotor.

Fig. 6-1.—Rotor típico de un motor de corriente alterna de tipo de jaula.



De lo que acabamos de exponer puede deducirse que en el rotor existe una corriente que, evidentemente crea un campo magnético. No obstante, esta corriente no se debe, por lo menos directamente, a la tensión aplicada al motor, sino que es inducida por el estator, motivo por el cual esos motores se denominan *de inducción*. La figura 6-2 representa el conjunto rotor-estator de un motor de corriente alterna de ese tipo, en el que podemos observar claramente que no existe contacto eléctrico entre los devanados del estator y del rotor.

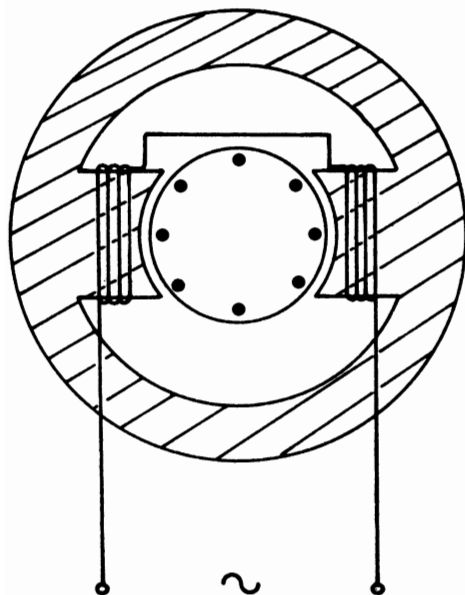


Fig. 6-2.—Conjunto rotor-estator de un motor de corriente alterna del tipo de inducción.

El rotor de un motor de inducción consiste en un cilindro formado por un conjunto de chapas de hierro, al silicio, prensadas de forma que constituyen un solo cuerpo. La superficie de este rotor está ranurada, y en las ranuras van encajadas las delgas que constituyen la jaula, todas ellas soldadas por los dos extremos a sendos anillos de latón.

Pero como hemos dicho ya anteriormente, no siempre el motor de corriente alterna tiene el rotor de tipo de jaula. Hay también rotores bobinados, en los que los conductores pasan por las ranuras del rotor. Pero en ambos casos el principio de funcionamiento es el mismo, fundándose en la acción conjunta de los campos del estator y del rotor.

6.2. DETALLES DEL FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCION.

Cuando se aplica una corriente alterna polifásica a un motor de inducción, en los devanados del estator se produce un campo mag-

nético que gira con una velocidad que es función de la frecuencia de la corriente. Este campo magnético atraviesa las delgas del rotor (o del devanado, según el caso) induciendo en ellas una corriente que a su vez origina un nuevo campo magnético, que tratará de alinearse con el del estator.

Al estudiar la ley de Lenz vimos que toda corriente inducida crea un campo que tiende a oponerse al primario, esto es, al que produce la corriente. En el caso del motor de inducción, esta reacción se manifiesta en forma de un par que actúa sobre el rotor, haciéndole girar según el sentido de rotación del campo del estator. En las figuras 6-3 y 6-4, en dos vistas, una longitudinal y otra transversal, respectivamente, se ilustra la forma en que se induce la corriente en el rotor.

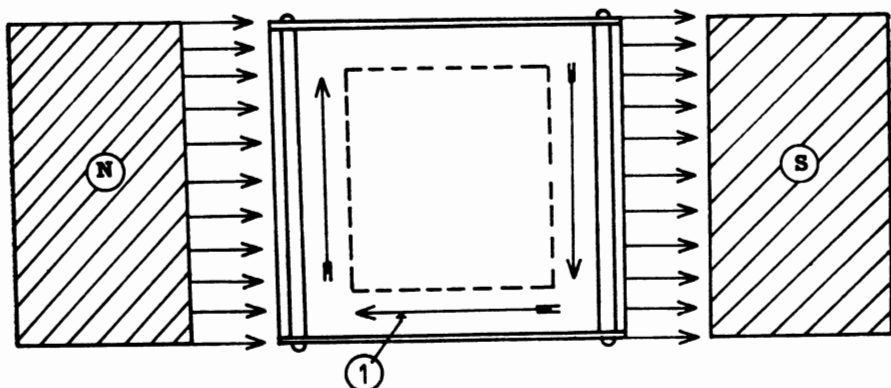


Fig. 6-3.—Vista longitudinal mostrando la inducción de corriente en el rotor.
1.—Corriente inducida en el rotor.

Funcionando la máquina en vacío, la velocidad de rotación del rotor se aproxima bastante a la del campo, no alcanzando esta velocidad, porque si lo hiciera dejaría de haber inducción de corriente en el rotor, ya que en relación a éste, el campo del estator no sería gíatorio, sino estático. Así, funcionando sin carga, la corriente en el rotor de un motor de inducción es pequeña, pues la velocidad de rotación del campo del estator en relación con el rotor es pequeña, dando origen a fuerzas electromotrices inducidas de valor reducido.

Cuando se aplica una carga al motor, el rotor se atrasa en relación con el campo del estator, dando margen a que en él se induz-

can corrientes de mayor intensidad. Este retraso se conoce por deslizamiento, y de él trataremos en el siguiente apartado.

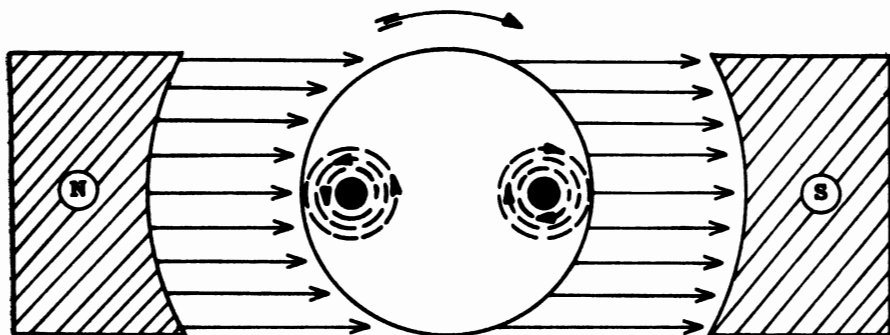


Fig. 6-4.—Vista general mostrando la inducción de corriente en el rotor.

6.3. DESLIZAMIENTO.

En la sección anterior vimos que el rotor del motor de inducción no puede girar con la velocidad del campo del estator, o velocidad síncrona, pues en esa hipótesis no habría movimiento relativo entre el campo del estator y las delgas o devanado del rotor, siendo nula, en consecuencia, la f.e.m. inducida (fig. 6-5). En este caso, como el

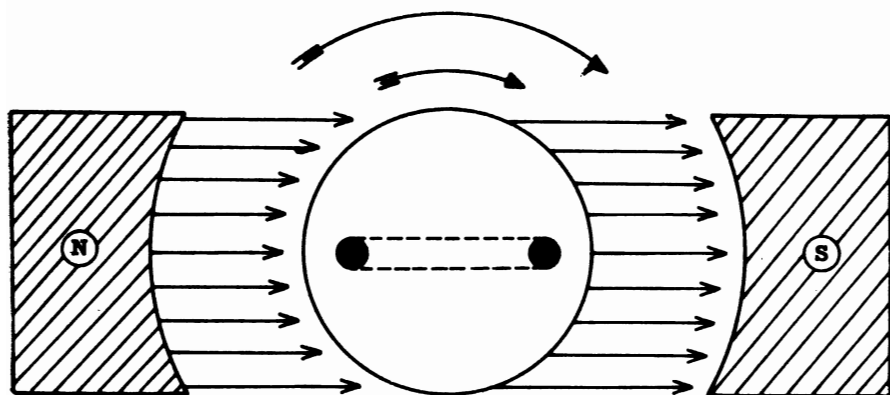


Fig. 6-5.—Valor nulo de la f.e.m. inducida, con el rotor girando con la misma velocidad que el campo del estator.

par motor también se anula, el rotor tiende a reducir un poco su velocidad, reducción que, en último caso, es función del par de la carga accionada.

La diferencia entre la velocidad síncrona o velocidad del campo del estator y la del rotor se denomina *deslizamiento* o *desfase*, expresándose en porcentajes de la velocidad de sincronismo. Así:

$$s (\%) = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100,$$

donde

s es el porcentaje de deslizamiento;

n_s es la velocidad síncrona, y

n_r es la velocidad del rotor de la misma unidad que n_s .

Mediante el simple análisis de la ecuación anterior podemos ver que cuanto menor sea el deslizamiento, más se aproximará la velocidad del rotor a la síncrona. Pero en funcionamiento normal, la velocidad del motor de inducción está relacionada con el par de la carga y cuanto mayor sea éste, menor será la velocidad con que el motor podrá accionarla. Esto es comprensible, porque para aumentar el par motor es preciso que se aumente el valor de la fuerza electromotriz (y, consecuentemente, de la corriente) inducida en el rotor, lo que sólo será posible si las delgas y los conductores de su devanado cortan las líneas de fuerza del campo del estator con mayor velocidad (fig. 6-6). Este aumento de la velocidad relativa entre el campo del estator y el rotor significa un mayor deslizamiento, esto es, obliga a que el rotor gire con una velocidad menor.

En términos prácticos, la reducción de velocidad necesaria para tener el aumento de par deseado es relativamente pequeña, especialmente en los motores del tipo de jaula, debido a la poca resistencia de las delgas y las soldaduras de los anillos. Así, pues, los motores de inducción pueden considerarse como de velocidad constante.

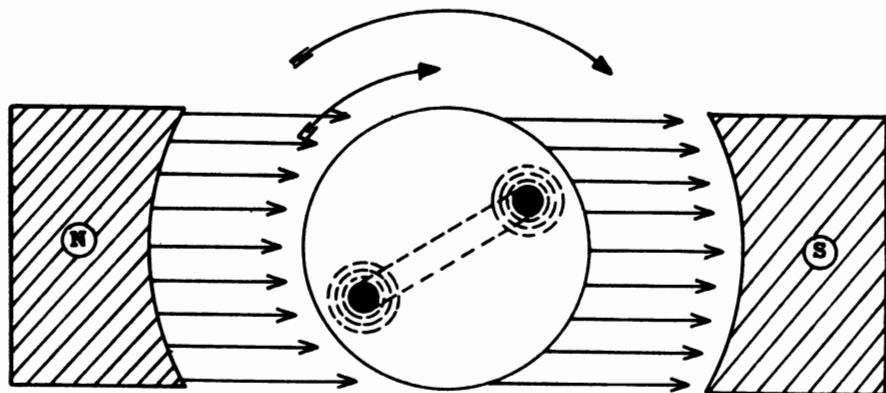


Fig. 6-6.—Para que haya un aumento del par motor es preciso que la f.e.m. inducida aumente, esto es, que el rotor se retrase en relación con el campo del estator.

6.4. MOTORES DE INDUCCION MONOFASICOS.

Los motores de inducción monofásicos tienen un solo devanado en el estator, dividido en bobinas que se distribuyen por su superficie. Este devanado genera un campo fijo, aunque pulsatorio, que tiene el sentido del eje de los campos, como puede apreciarse en la figura 6-7.

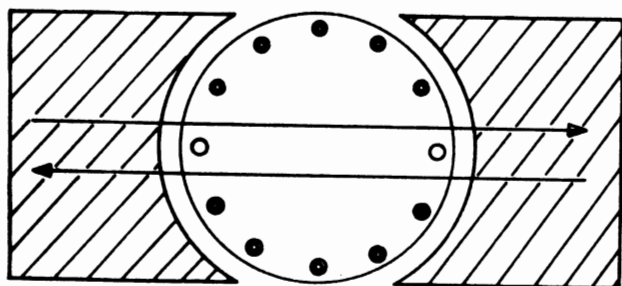


Fig. 6-7.—El campo de un motor monofásico de c.a. es fijo, pero con pulsaciones alternas.

Estando el motor parado, la expansión y la contracción del campo del estator inducen en el rotor corrientes que originan un campo opuesto al del estator, de modo que no se produce ningún par de

arranque, comportándose el motor como un simple transformador monofásico con el secundario en cortocircuito. Pero si se previera un medio auxiliar que posibilitase el arranque del motor, éste continuaría girando indefinidamente, en cuanto hubiera una corriente circulando por el devanado del estator.

Como mejor puede comprenderse tal comportamiento es considerando que cuando el rotor se pone en movimiento, además de la f.e.m. en él inducida, como explicamos antes, habrá una f.e.m. generada en virtud de su rotación en el interior del campo estacionario del estator. Esta segunda tensión produce entonces unas corrientes que dan origen a un campo desfasado 90° en relación con el del estator, creando unas condiciones para que sobre el rotor actúe un par que lo haga girar en el sentido del impulso inicial, como se ilustra en la figura 6-8.

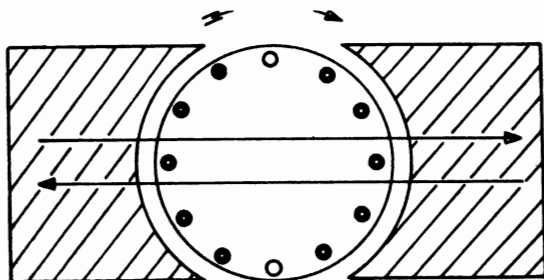


Fig. 6-8.—Cuando se da un impulso inicial a un motor monofásico surge en el inducido un campo desfasado 90° en relación con el del estator, creando unas condiciones para que el motor continúe girando.

El arranque manual en los motores eléctricos no es nada práctico, por lo que se han desarrollado métodos automáticos de arranque para los motores de inducción monofásicos. A continuación trataremos de estos métodos, que dan nombre a los diferentes motores de ese tipo empleados en la industria y en los aparatos de uso doméstico.

6.5 MOTORES DE FASE DIVIDIDA (O DE FASE AUXILIAR).

Los motores de inducción monofásicos de fase dividida utilizan el artificio de transformar la corriente monofásica en dos corrientes desfasadas, mediante el empleo de un devanado auxiliar o de arranque.

que, situado en el estator y conectado como se muestra en la figura 6-9. Eléctricamente hablando, los dos devanados están conectados en paralelo, pero sus ejes están desfasados 90° .

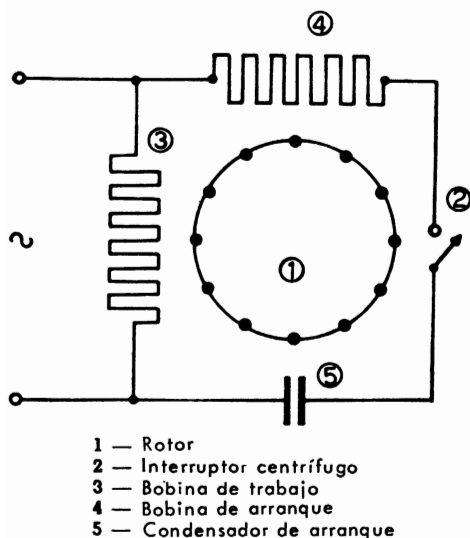


Fig. 6-9.—Circuito eléctrico de un motor monofásico de fase dividida.

El devanado de arranque tiene características diferentes a las del de trabajo, pues está bobinado con hilo de pequeño calibre y con menos espiras que éste, lo que es posible teniendo en cuenta que sólo permanece en el circuito hasta que el motor alcanza el 75 por 100 de su velocidad nominal. De esta forma, la relación resistencia/reactancia del devanado de arranque es mayor que la del de trabajo, haciendo que las corrientes que por ellos circulan estén fuera de fase, comportándose como corrientes bifásicas no equilibradas y haciendo al motor equivalente a un motor bifásico no equilibrado. Este artificio crea un campo giratorio (y no sólo pulsatorio) en el estator, que permite el arranque del motor.

Como ya dijimos antes, el devanado de arranque sólo queda en el circuito hasta que el motor alcanza el 75 por 100 de su velocidad nominal, porque en serie con él se halla un interruptor centrífugo que se desconecta cuando el motor alcanza dicha velocidad. El sentido de rotación de un motor de fase dividida puede invertirse, bastando

para ello simplemente con invertir las conexiones del devanado de arranque.

La característica principal de este tipo de motor es su velocidad prácticamente constante en condiciones de carga variable, teniendo un comportamiento semejante al de un motor de c.c. con excitación en paralelo. Como inconveniente podemos citar la posibilidad de no funcionar el contacto centrífugo, provocando entonces el quemado del devanado de arranque. Teniendo en cuenta que ese tipo de motor no requiere un mantenimiento frecuente, se utiliza mucho en aplicaciones industriales y domésticas, tales como equipos de refrigeración y extractores de humos.

6.6. MOTORES DE ARRANQUE CAPACITIVO.

Los motores monofásicos con arranque capacitivo son también motores de fase dividida, pero en este caso el desplazamiento de fase entre las corrientes que circulan por los devanados de arranque y de trabajo se obtiene principalmente gracias a la inclusión de un condensador en serie con el devanado de arranque, como puede observarse en la figura 6-10. Esto significa que este devanado puede bobinarse con hilo más grueso y con más espiras que el del motor de fase dividida analizado antes. En este motor, el devanado de arranque y el condensador también pueden retirarse del circuito cuando el motor sobrepasa el 75 por 100 de la velocidad nominal, mediante la actuación de un contacto centrífugo, indicado en la figura 6-10.

No obstante, existen motores que utilizan el condensador y el arrollamiento de arranque permanentemente en el circuito, lo que elimina el contacto centrífugo y hace que el motor sea más silencioso, pero como contrapartida el par motor se reduce. Además de ello, teniendo presente que los condensadores electrolíticos secos para c.a. utilizados en los demás motores de fase dividida no pueden someterse a regímenes permanentes de trabajo, en el motor sin contacto centrífugo debe utilizarse un condensador de papel impregnado de aceite, que es mayor y más caro.

Empleando un condensador de valor apropiado se pueden obtener corrientes desfasadas hasta 90°, lo que equivale a decir que durante el arranque dicho motor se comporta como un motor bifásico equi-

librado. También aquí los ejes de los devanados de arranque y de trabajo se encuentran desfasados 90°, siendo posible la obtención de pares de arranque de cerca de 350 por 100 del par con plena carga.

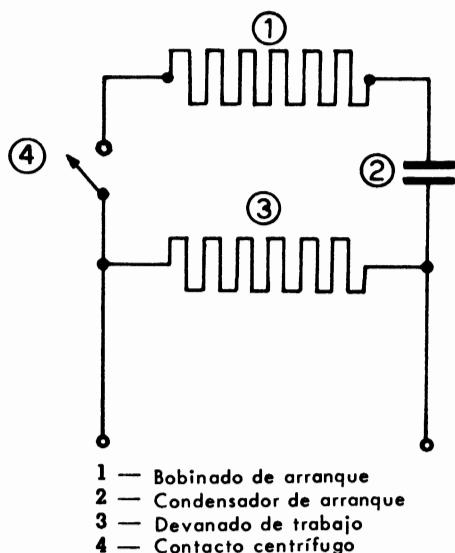


Fig. 6-10.—Circuito eléctrico de un motor monofásico con arranque capacitivo.

Los motores monofásicos de fase dividida y arranque por condensador se utilizan mucho en aplicaciones que requieren un motor de 1 a 10 HP. Para potencias más elevadas no son económicos, pues precisan un condensador de arranque de capacidad muy alta.

La capacidad de un condensador de arranque de un motor monofásico del tipo que estudiamos puede calcularse por la fórmula:

$$C = \frac{P \times 3,18 \times 10^6}{E^2 \times \cos \varphi},$$

donde

C es la capacidad en microfaradios (μF);

P es la potencia del motor en kilovatios (kW);

E es la tensión de alimentación en voltios, y

$\cos \varphi$ es el factor de potencia de la máquina.

Vamos a suponer, por ejemplo, que hemos de calcular un condensador de arranque para un motor monofásico de 2kW, 220 V, con un factor de potencia de 0,7. El valor del condensador será:

$$C = \frac{2 \times 3,18 \times 10^6}{220^2 \times 0,7} = 187 \mu\text{F}.$$

Como no existe en el comercio un condensador con este valor, usaríamos una unidad normalizada de 180 μF .

6.7. MOTORES CON POLOS AMORTIGUADORES.

Los motores de inducción monofásicos con polos amortiguadores son de fabricación más simple, y, además, requieren menor mantenimiento. Su principio de funcionamiento se basa en la deformación del campo magnético del estator provocada por una espira en cortocircuito situada en la expansión polar.

Como se recordará, cuando por un electroimán circula una corriente eléctrica, el campo generado se concentra en el núcleo. También sabemos que cuando un campo magnético alterno corta una espira de conductor, induce en ella una f.e.m. alterna que crea una corriente alterna.

Al estudiar la ley de Lenz vimos que la corriente inducida por un flujo tiende a oponerse al flujo que la originó. En la figura 6-11 se halla representada una de las masas o zapatas polares del estator de un motor con los polos amortiguadores. El núcleo, como se verá, tiene una ranura por la que pasa una espira de cobre en cortocircuito. Si no existiera esa espira la distribución del campo sería uniforme; no obstante, debido a su presencia, la uniformidad del campo deja de existir, produciéndose una debilitación en la zona del núcleo abarcada por la espira, teniendo presente el flujo debido a la corriente en ella inducida por el flujo principal.

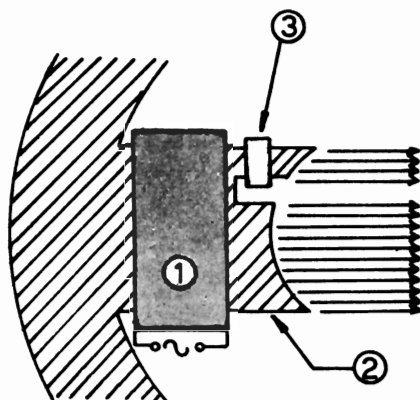


Fig. 6-11.—Masa polar del estator de un motor monofásico con polos amortiguadores.

- 1 — Bobina de campo
2 — Masa polar
3 — Espira en cortocircuito

La presencia de la espira en cortocircuito, por tanto, retarda las variaciones del flujo principal en la región del polo por ella abarcada, provocando una desviación en la dirección del campo como se ilustra en la figura 6-12; este efecto equivale al de un campo giratorio, que se mueve en la dirección indicada en la figura, produciendo un par de arranque, que, aunque pequeño, es suficiente para poner el motor en movimiento.

Como ya afirmamos en otra ocasión, la velocidad de un motor no es idéntica a la del campo magnético del estator, que depende del número de polos y de la frecuencia de la corriente alterna que lo alimenta. En el caso de los motores con polos amortiguadores, la velocidad teórica de funcionamiento puede calcularse con la fórmula

$$n = \frac{60 \times f}{p},$$

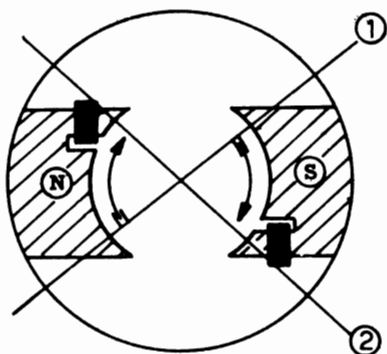
donde

n es la velocidad teórica de funcionamiento en r.p.m.;

f es la frecuencia de la corriente alterna, y

p es el número de polos principales del estator.

Fig. 6-12.—Desviación del campo magnético del estator de un motor con polos amortiguadores.



- 1 — Dirección de las líneas de fuerza para el máximo flujo inductor.
2 — Mínimo flujo inductor.

Analizando la fórmula anterior, comprobamos que al aumentar la frecuencia de la corriente alterna lo hará proporcionalmente la velocidad del motor, al paso que si aumentamos el número de polos, la velocidad disminuirá. En un motor real, la velocidad nominal de funcionamiento es menor que la teórica, debido al roce del eje en los cojinetes y también al desplazamiento de fase observado cuando se aplica una carga. En las mejores condiciones ese desplazamiento alcanza el 10 por 100 de la velocidad teórica, si bien, según la carga, puede llegar al 40 por 100 de dicha velocidad.

6.8. TIPOS DE MOTORES CON POLOS AMORTIGUADORES.

A causa de su simplicidad, bajo costo y mantenimiento poco frecuente, los motores monofásicos con polos amortiguadores se emplean mucho cuando se requiere baja potencia y pequeño par de arranque, como ocurre en los ventiladores, tocadiscos, etc.

En los ventiladores, el tipo más usual es el que se muestra en la figura 6-13, dotado de un núcleo laminado en forma de U y de un arrollamiento.

El sentido de rotación del motor, como vimos ya, es función de la posición de las espiras en cortocircuito. En el caso de la figura 6-13,

la rotación se efectúa en el sentido de las agujas del reloj, y, en consecuencia, la inversión de las posiciones de las espiras también invertiría el sentido de rotación.

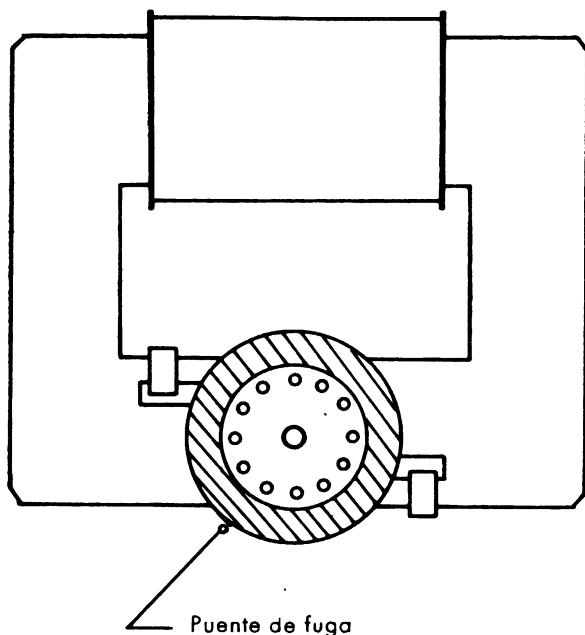


Fig. 6-13. — *M o t o r con polos amortiguadores y núcleo en U.*

Los bordes de las expansiones polares, a veces, van unidos por unas chapas de hierro, que constituyen lo que se denomina *punto de fuga* para una parte de las líneas de fuerza. Esta disposición sirve para estabilizar la rotación del motor, y solamente se emplea en los estatores en los que las expansiones polares están muy descentradas, como sucede en los motores con estator abierto; no se emplean puentes de fuga en los estatores cerrados. En las figuras 6-14 y 6-15 se ilustran dos estatores de ese tipo, siendo el primero bipolar y el segundo tetrapolar.

Existe también otro tipo de motor con polos amortiguadores, en el cual la disposición de los elementos se halla invertida; esto es, el rotor de jaula es fijo y la armadura móvil. Esos motores, de uso bas-

tante limitado, normalmente están dotados de varios polos, lo que hace que su velocidad sea bastante reducida, del orden de 100 r.p.m.

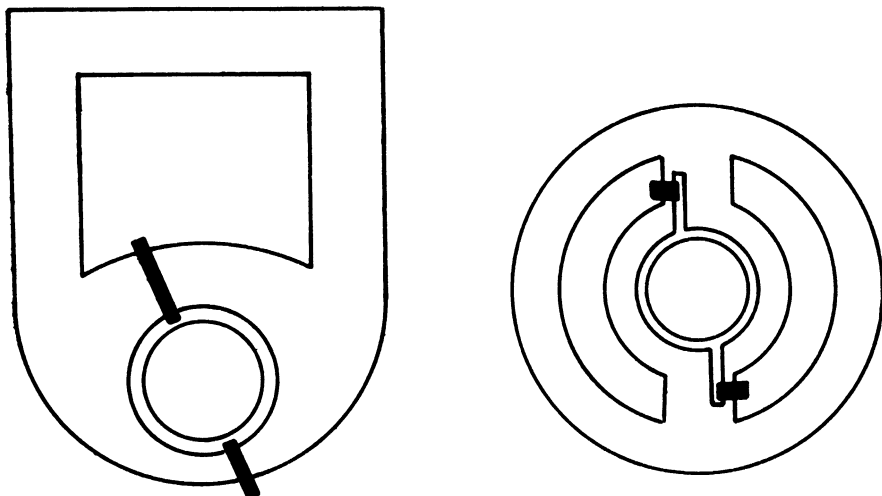


Fig. 6-14.—Estator bipolar cerrado.

a) Estatores cerrados.

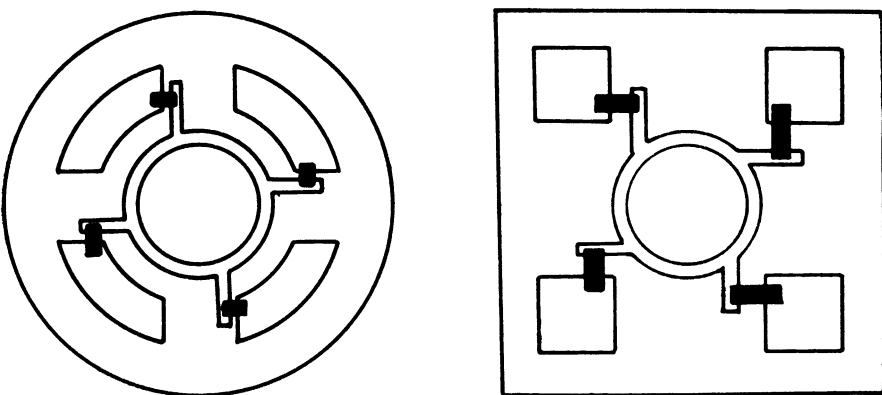


Fig. 6-15.—Estator tetrapolar cerrado.

a) Estatores cerrados.

6.9. MOTORES DE INDUCCION POLIFASICOS.

Los motores de inducción polifásicos se emplean mucho para aplicaciones que requieren potencias medias y altas. Debido a su simplicidad y robustez, el motor polifásico de tipo de jaula se emplea normalmente cuando el accionamiento se realiza con una velocidad constante, en tanto que los motores con rotor bobinado compiten con los motores de corriente continua en los accionamientos con velocidad ajustable.

Como se vio anteriormente, el par motor responsable del movimiento del rotor, en lo que respecta a motores de corriente continua, se debe a la reacción entre dos campos, uno del estator y otro del rotor. En dichos motores, debido a la existencia de conexión eléctrica entre el estator y el inducido, es preciso utilizar un anillo colector y dos escobillas, sistema que permite al mismo tiempo la alimentación del devanado del inducido y realiza la inversión del sentido de recorrido de la corriente por el devanado, condición indispensable para que el motor continúe girando.

Por el contrario, en los motores de inducción no existe conexión eléctrica entre el estator y el inducido, y la corriente que circula por este último está inducida por el campo magnético del estator. En los motores monofásicos, como se acaba de estudiar, el campo del estator es estacionario y pulsatorio, cambiando de señal de acuerdo con la frecuencia de la corriente que lo alimenta. Esto obliga a que se recurra a métodos que permitan el arranque del motor, pues sin ellos la máquina se comporta como un simple transformador monofásico con el secundario en cortocircuito.

En los motores de inducción polifásicos no sucede esto, pues el campo del estator es siempre giratorio, realizándose el arranque del motor automáticamente cuando se conecta a la red de alimentación. Se emplean dos tipos de rotores, como hemos dicho ya, en los motores de inducción polifásicos: el del tipo de jaula y el de devanado, poseyendo ambos un núcleo cilíndrico laminado, con ranuras periféricas paralelas por donde pasan los conductores. El rotor de tipo de jaula es semejante al descrito anteriormente, estando formado por unas delgas metálicas sin aislar conectadas en cortocircuito. El rotor bobinado está arrollado a semejanza del de un motor de c.c., debiendo tener el mismo número de polos que el arrollamiento del estator, si bien el número de fases puede ser diferente.

En la gran mayoría de los casos, los rotores bobinados son trifásicos, estando sus bornes conectados, por medio de anillos colectores a tres escobillas que, a su vez, están conectadas a resistencias variables que permiten la regulación de la velocidad del motor. Debido a la inclusión de las resistencias en el circuito del rotor en el momento del arranque, es posible obtener altos pares de arranque con sólo el 120 por 100 de la corriente con plena carga, lo que sin duda alguna es ventajoso, ya que evita caídas de tensión en la red de alimentación durante el arranque.

Retirando progresivamente las resistencias del circuito del rotor, el motor se acelera suavemente, recalentándose muy poco durante el arranque. Si los anillos se pusieran en cortocircuito, el motor alcanzaría su velocidad nominal. Como principal desventaja de este tipo de motor podemos citar su construcción, que no es tan económica como la del tipo de jaula, asemejándose bastante a las de los motores de corriente continua.

CUESTIONARIO

- 1) *¿Por qué la construcción de los motores de c.a. es más sencilla que la de los de c.c.?*
- 2) *¿Existe alguna conexión eléctrica directa entre el estator y el rotor de un motor de corriente alterna?*
- 3) *¿Cómo se explica la existencia de una corriente en el circuito del rotor de un motor de corriente alterna?*
- 4) *¿Cómo se llaman también los motores de corriente alterna?*
- 5) *¿Cuáles son los tipos de rotor utilizados en los motores de corriente alterna?*
- 6) *¿Cómo está constituido el estator de los motores monofásicos?*
- 7) *En los motores de fase dividida, ¿cuál es la diferencia entre las bobinas de arranque y de trabajo?*
- 8) *En un motor monofásico con condensador, ¿cómo está conectado éste en relación con el devanado de arranque?*
- 9) *¿Cuál es el tipo de motor normalmente empleado en ventiladores, tocadiscos y máquinas de afeitar?*
- 10) *¿Cuál es el factor que impone el sentido de giro del rotor en los motores de la pregunta anterior?*

7

Motores síncronos

7.1. INTRODUCCION.

En la mayor parte de los motores la velocidad está subordinada a las variaciones de la tensión de la red y de la carga. Esta característica los hace poco útiles para aplicaciones en las que la velocidad constante sea un factor primordial. Existe un grupo de motores de corriente alterna, no obstante, cuya principal característica es exactamente la velocidad constante en un amplio margen de variaciones de carga y de tensión, velocidad que sólo es función de la frecuencia de la c.a. de la red de alimentación.

Los motores a los que nos referimos se denominan síncronos, y los tipos que trataremos a continuación, de uso bastante difundido en la industria, son todos de poca potencia, con aplicación para relojes eléctricos, registradores, reguladores automáticos y diversos tipos de servomecanismos que tienen en el motor síncrono su elemento más importante. Al igual que el motor de inducción monofásico, el motor síncrono monofásico no dispone tampoco de medios propios para arrancar automáticamente, siendo necesario usar dispositivos auxiliares de arranque o un motor de inducción que lleve al motor síncrono hasta las proximidades de la velocidad de sincronismo.

Los motores polifásicos pueden arrancar por sus propios medios, aunque en ese caso las corrientes de arranque tienen un valor muy elevado, lo que no siempre se admite. Para subsanar este inconveniente, normalmente se aplica en el arranque del motor síncrono una

tensión reducida, y en muchas ocasiones se prefiere incluso el método de arranque con motor auxiliar.

7.2. MOTOR SINCRONO DE ROTOR TUBULAR.

Como ya se ha dicho en el apartado anterior, no vamos a ocuparnos aquí de los motores síncronos de grandes dimensiones, sino de los de poca potencia, normalmente monofásicos. Tal es el caso de los motores de rotor tubular, que utilizan los mismos métodos de arranque de los motores de inducción monofásicos, si bien en el aspecto constructivo haya alguna diferencia entre ellos. Un motor síncrono de rotor tubular no es un motor de tipo de jaula, estando su rotor formado por chapas de hierro cortadas en anillo, yuxtapuestas y mantenidas en posición por medio de cabezas de aluminio, de la forma que se ilustra en la figura 7-1.

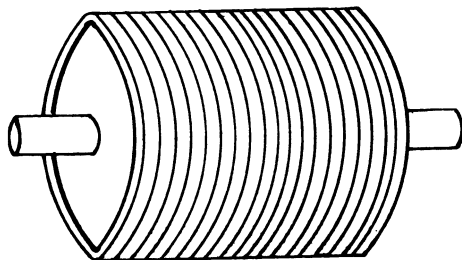


Fig. 7-1.—Rotor tubular de un motor síncrono.

El rotor de un motor de este tipo no es macizo, sino hueco. Cuando tal rotor se encuentra en el interior de un campo magnético, formado por las expansiones polares de un estator alimentado con corriente alterna, en cada anillo se formará un imán, con los polos orientados de tal forma que queden en el mismo plano del campo inductor, como puede verse en la figura 7-2.

Si cortamos la corriente que alimenta el campo inductor como consecuencia del magnetismo remanente, el rotor aún permanecerá imantado durante breves instantes. Si, no obstante, invertimos el sentido del curso de la corriente, habrá una confrontación, aunque por poco tiempo, de polos magnéticos del mismo signo, dando mar-

gen a que el rotor haga una rotación de 180° cuando se le aplique un pequeño impulso. Repitiendo esta operación, cuando la corriente vuelva a invertirse, el motor estará en condiciones de continuar girando, y así sucesivamente.

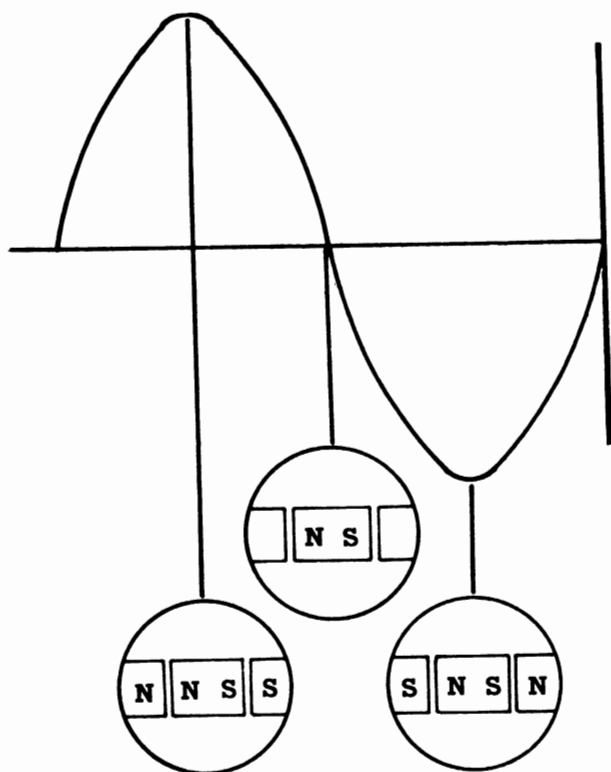


Fig. 7-2.—Principio de funcionamiento de un motor síncrono de rotor tubular.

De lo expuesto podemos concluir que la velocidad de ese tipo de motor es función de la frecuencia de la corriente alterna que alimenta el estator, esto es, su rotor recorre 180° exactamente en cada medio ciclo de corriente. De esto proviene la denominación de motor síncrono.

El arranque de este tipo de motor tiene que hacerse por medios auxiliares, ya que la reacción del inducido monofásico no crea un

campo giratorio. Así, puede emplearse un motor auxiliar de arranque o uno de los procedimientos usados en los motores de inducción monofásicos, cuales son los de fase dividida, y de condensador de arranque. En este último caso, el estator del motor está compuesto de cuatro masas polares, con sus respectivas bobinas. El primer par de bobinas, opuestas en relación al eje de la máquina, forma el devanado de trabajo, mientras que el otro par constituye el devanado de arranque.

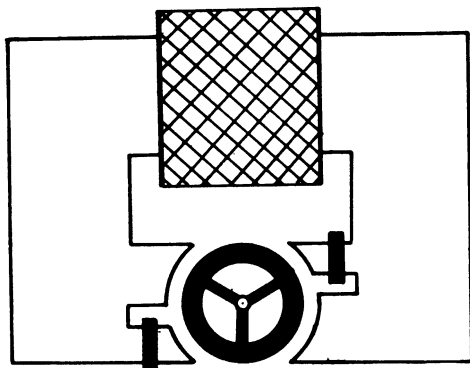


Fig. 7-3.—Circuito eléctrico de un motor síncrono de rotor anular.

De la misma forma que en los motores de inducción, el devanado de arranque puede desconectarse del circuito por medio de un interruptor centrífugo durante el funcionamiento del motor con velocidad constante. En el caso de no haber contacto centrífugo, el devanado de arranque deberá proyectarse de forma que permanezca indefinidamente en el circuito sin recalentarse. En el motor síncrono de rotor tubular ocurre un hecho curioso, en lo que respecta a la velocidad, cuando la máquina se somete a una sobrecarga mecánica: En estas condiciones, el motor trabaja como si se estuviera frenando, produciéndose en el rotor fenómenos análogos a los que ocurren en un motor de tipo de jaula. Al disminuir la sobrecarga se produce un aumento de velocidad, volviendo el motor a la de sincronismo cuando desaparece la sobrecarga. En los motores síncronos de mayor tamaño no ocurre así, pues si una sobrecarga saca de sincronismo al motor, éste tiende a pararse. Una variante del motor de rotor tubular es el denominado de rotor anular, representado en la figura 7-3. De construcción muy simple, este motor consiste en un

electroimán con una sola bobina, difiriendo apenas del motor con polos amortiguadores en lo que se refiere al rotor, que en este caso está formado por varios anillos de acero templado dotados de una faja diametral por cuyo centro pasa el eje. Como el rotor es de acero queda permanentemente imantado una vez expuesto a la influencia del campo magnético del estator.

La velocidad de este tipo de motor es de, aproximadamente, 3.000 r.p.m., cuando se alimenta con una corriente de 50 Hz. Como en el motor con polo amortiguador, el sentido de rotación de este motor también está determinado por la posición de las espiras en cortocircuito.

7.3. MOTOR SINCRONO CON ROTOR TETRAPOLAR.

Este motor, esquematizado en la figura 7-4, es más complicado que los representados anteriormente. Como vemos, el estator está constituido por cuatro masas polares, poseyendo cada una su propio arrollamiento. La conexión de las bobinas se hace de tal forma que las masas polares opuestas sean del mismo signo, y, lógicamente, las adyacentes son de signo contrario. El rotor está constituido por la superposición de láminas en forma de cruz de brazos iguales.

En este tipo de motor, como en todos los sincrónicos, la velocidad está determinada por la frecuencia de la corriente de alimentación y por el número de polos o masas polares, según la fórmula:

$$n_s = \frac{120 \times f}{p},$$

donde

n_s es la velocidad síncrona del motor;

f es la frecuencia de la corriente alterna que alimenta el estator, y

p es el número de polos del estator.

De este modo, si tuviéramos un motor de cuatro polos, con la frecuencia de 50 Hz la velocidad sería:

$$n_s = \frac{120 \times 50}{4} = 1.500 \text{ r.p.m.}$$

Este motor, conforme se representa, tiene poca utilidad, pues no puede arrancar automáticamente. Para ello sería preciso dotarlo de medios auxiliares, ya por división de fase, por condensador de arranque o por inclusión de espiras en cortocircuito.

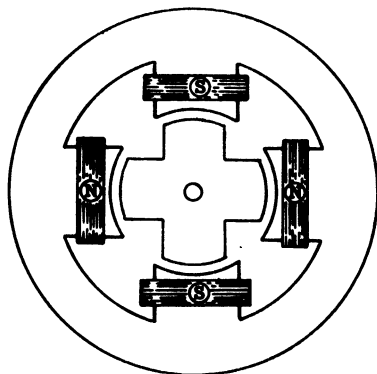


Fig. 74.—Motor síncrono de rotor tetrapolar.

7.4. MOTOR SINCRONO MULTIPOLAR.

Cuando para una aplicación dada se precisen motores de velocidad baja y constante, se utilizarán motores multipolares, que se fabrican en una amplia gama de potencias. En la figura 7-5 se muestra un tipo bastante común, cuyo estator está compuesto por una sola bobina y por las masas polares, que cubre casi por completo el rotor dentado.

El arranque de este tipo de motor se realiza generalmente por medios manuales, y el sentido de rotación viene determinado por el del impulso inicial. Su empleo es frecuente en relojes eléctricos.

El movimiento del rotor lo determina la acción magnética de los dientes del estator sobre los del inducido. Esta acción es simultánea e idéntica en todos los dientes, de modo que estudiando lo que sucede con uno de los del rotor, por analogía habremos visto lo que ocurre con los demás. Con este fin vamos a suponer que el diente considerado se encuentra frente al espacio comprendido entre los dientes del estator. Cuando circula una corriente por la bobina, el diente se coloca frente al diente más próximo, o sea, el diente para

el que haya sido impulsado, suponiendo que el arranque se haya hecho manualmente.

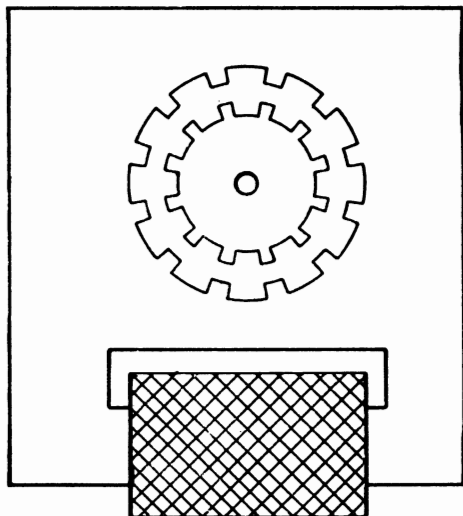


Fig. 7-5.—Motor síncrono multipolar.

Una vez transcurrido el primer semiciclo de la corriente, ésta pasa por el valor cero, anulando el campo del estator. El rotor, no obstante, continúa girando, debido a su inercia, de forma que cuando surge otro semiciclo, el diente considerado estará a medio camino del espacio entre otros dos dientes del estator, y el campo formado tenderá a colocarlo frente al diente siguiente. Observamos, pues, que en un ciclo completo de la corriente cada diente del rotor avanza dos del estator.

En este motor, la velocidad también puede calcularse por la fórmula dada anteriormente. Así, en el motor de la figura 7-5, con 12 polos, alimentado por una corriente de 50 Hz, tendremos:

$$n_s = \frac{120 \times 50}{12} = 500 \text{ r.p.m.}$$

CUESTIONARIO

- 1) *¿Qué tipos de motores conoce?*
- 2) *¿Cuál es la expresión de la velocidad de un motor síncrono?*
- 3) *¿Qué sucede con el devanado de arranque de los motores síncronos cuando se alcanza la velocidad de sincronismo?*
- 4) *¿Cuál es la expresión de la velocidad de los motores síncronos de rotor tubular?*
- 5) *¿Cómo se realiza el arranque en los motores síncronos multipolares?*
- 6) *¿Dónde se emplea, por lo general, el motor síncrono multipolar?*

8

Motores universales

8.1. CARACTERISTICAS GENERALES.

Existe un tipo de motor capaz de funcionar con corriente continua y con alterna, por lo que se le denomina *universal*. Los motores universales han tenido gran aceptación en la industria de los electrodomésticos, pues se emplean comúnmente en exprimidores, batidoras, aspiradores de polvo, etc.

Cuando estudiamos el motor de c.c. de tipo en serie, vimos que el sentido de rotación del eje no dependía de la polaridad de la tensión aplicada, pudiendo sólo ser invertido por la inversión de las conexiones del estator o del inducido. Así, llegamos a la conclusión de que si un motor de c.c. de tipo en serie se conectara a una fuente de c.a., también se produciría un par motor que tendería a hacerlo girar en un sentido determinado.

El motor de c.c. en serie, sin embargo, no funciona satisfactoriamente cuando se alimenta con corriente alterna, pues:

- 1) La corriente alterna, como ya sabemos, produce grandes cantidades de corrientes parásitas y pérdidas por histéresis en las partes no laminadas de los motores de corriente continua. Esto ocasiona un calentamiento excesivo y perjudicial en el motor, con la consiguiente reducción de su rendimiento y su vida útil.

- 2) Cuando se alimenta con corriente alterna, la resistencia óhmica de los devanados, proyectados para motores de corriente continua, debe sumarse a la reactancia inductiva. Este nuevo factor hace

que la impedancia total de los devanados aumente, con la consiguiente pérdida de potencia.

3) Las bobinas que quedan en cortocircuito a través de las escobillas, son recorridas por corrientes muy intensas, produciendo chispas en el colector y provocando su rápida inutilización.

Generalmente, los motores universales utilizados en la industria, y los de uso doméstico, están previstos para funcionar con c.a. En este caso, las pérdidas por corrientes parásitas y por histéresis pueden reducirse si el circuito magnético que incluye el estator con su carcasa externa y el núcleo del inducido estuviera construido con láminas de hierro al silicio de alta permeabilidad, aisladas entre sí como lo están en los transformadores.

Con respecto a la reactancia de los devanados de los campos, puede mantenerse en un valor relativamente bajo mediante el empleo de núcleos de polos cortos y devanados de pocas espiras. A este fin, también conviene tener en cuenta que la densidad de flujo y la reluctancia de todo el circuito magnético deben mantenerse en un valor bastante bajo. La reducción de la reluctancia puede obtenerse disminuyendo el espacio comprendido entre el estator y el inducido, sin que esto, no obstante, pueda interferir con el buen funcionamiento mecánico del motor.

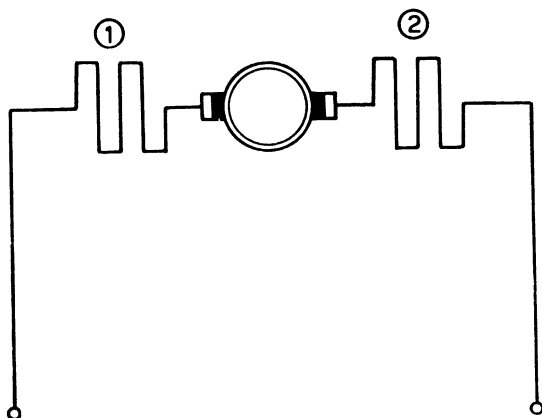


Fig. 8-1.—Compensación conductiva de la reactancia del inducido.

1 — Campo
2 — Bobina compensadora

La reluctancia del inducido puede mantenerse en un valor adecuado, empleándose devanados compensadores montados en el núcleo del estator. Cuando los devanados de campo y compensador están conectados en serie, como se ilustra en la figura 8-1, la compensación se denomina conductiva. No obstante, si el devanado compensador está conectado en cortocircuito, se dice que el inducido está compensado inductivamente:

El eje geométrico del devanado compensador se desplaza en relación con el eje del campo principal, siendo esta disposición semejante a la empleada en los motores y generadores de corriente continua para vencer la reacción del inducido. La finalidad del devanado compensador es establecer una fuerza magnetomotriz opuesta a la producida en el inducido, con fines de neutralización, evitando así la distorsión o desviación del flujo magnético del estator y, al mismo tiempo, reduciendo la reactancia del inducido.

El devanado compensador inductivo actúa sobre el inducido de la misma forma que un secundario en cortocircuito lo hace sobre el primario de un transformador. Su empleo, sin embargo, se restringe a los motores de alta potencia, pues en los de potencia fraccionaria este problema se resuelve de forma más económica.

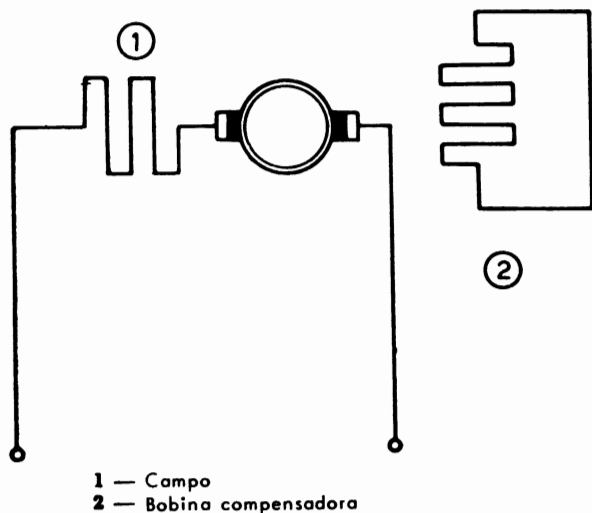


Fig. 8-2.—Compensación inductiva de la reactancia del inducido.

En los motores pequeños la reactancia se reduce disminuyendo la cantidad de espiras de los campos. Esto, evidentemente, tiene como resultado la reducción de la intensidad de los campos y la consiguiente disminución del par motor en el arranque, y en condiciones nominales de funcionamiento. Vemos, pues, que el cometido mecánico de estos motores se sacrifica un tanto por la necesidad de obtener un mejor cometido eléctrico y, al mismo tiempo, reducir el coste del motor.

Las características generales de funcionamiento de los motores universales son similares a las de los motores de corriente continua del tipo en serie, ya estudiados. En ellos también la velocidad es función de la carga impuesta al motor, cuya velocidad puede alcanzar valores peligrosos cuando el motor trabaja sin carga.

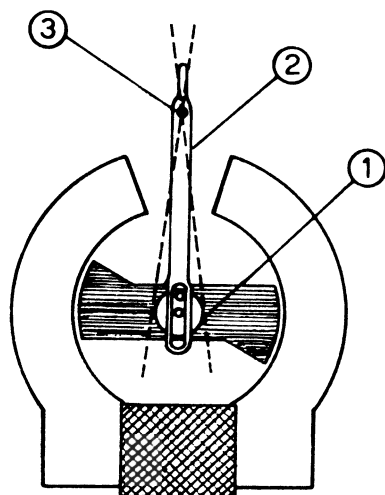
8.2. MOTOR PARA AFEITADORAS ELECTRICAS.

Este tipo de motor funciona basándose en principios muy diferentes de los estudiados, pudiendo ser incluido, no obstante, en la categoría de los motores universales, pues funciona tanto con c.c. como con c.a. Su principal característica es que la corriente no circula por el devanado durante todo el tiempo de funcionamiento del motor, interrumpiéndose por dos veces durante una vuelta del rotor, por la acción de un interruptor montado en su eje.

El principio de funcionamiento de este motor se funda en que una pieza de hierro, sustentada entre los polos de un imán, de modo que puede girar libremente entre ellos, toma siempre la dirección de las líneas de fuerza del campo magnético. Además de este principio, también la inercia mecánica de un cuerpo en movimiento se aprovecha en este caso para mantener la rotación del motor después de su activación.

El estator de este motor es de tipo normal en forma de U, como se ilustra en la figura 8-3, y está dotado de un solo devanado; los brazos de la U constituyen los polos del estator. El rotor, sin embargo, es muy distinto de los vistos antes. Como puede observarse en la figura, no es cilíndrico, pero tampoco tiene sección rectangular, pues sus extremos están redondeados y dotados de expansiones. Este rotor está formado por láminas de hierro superpuestas, y las expansiones

laterales solamente sirven para determinar el sentido de rotación del motor.



Vista lateral

- 1 — Biela
- 2 — Balancín
- 3 — Eje de oscilación

Fig. 8-3.—Vista anterior de un motor para máquina de afeitar eléctrica.

El eje de este tipo de motor tiene tres funciones diferentes, pues además de mantener el rotor en posición, acciona también la excéntrica que pone en funcionamiento el mecanismo de las cuchillas (figura 8-4) y el mecanismo que abre y cierra los contactos del interruptor conectado en serie con la bobina y la red de alimentación (fig. 8-5). Debido a la configuración elíptica de la pieza que abre y cierra los contactos, la presión que ejercen en ella las láminas cuando se desconecta el interruptor de alimentación del motor, tiende a forzar el rotor a una posición perpendicular a la representada en la figura 8-3 que corresponde a la de los contactos cerrados. Esta condición es necesaria, y algunas máquinas de afeitar hasta incluyen una pieza que permite colocar el rotor en la posición indicada cuando el motor está desconectado, de modo que cuando se cierra de nuevo el interruptor de alimentación, el devanado del estator se activa y el motor arranca.

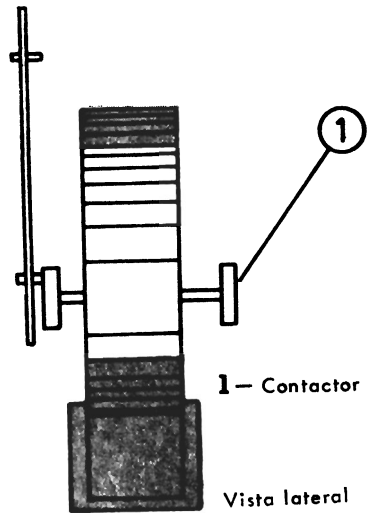


Fig. 84.—Vista lateral del motor.

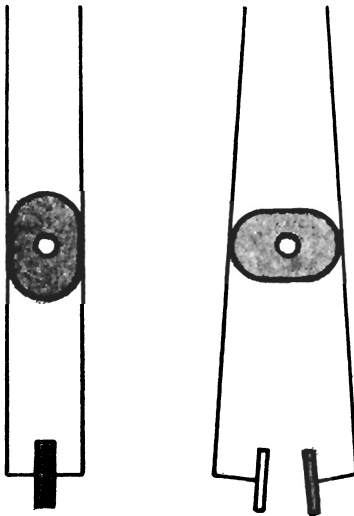


Fig. 85.—Detalle de los contactos.

En el arranque, por tanto, el campo magnético que se establece entre los polos, hace que el rotor gire y se coloque en paralelo con las líneas de fuerza, pero cuando alcanza esta posición, efectuando 1/4 de vuelta, las láminas de los contactos se abren, por efecto del contactor, y el campo magnético se extingue. Debido a la inercia del rotor en movimiento, éste sobrepasa la posición horizontal y adopta una nueva posición en la que los contactos se vuelven a cerrar, posición que es opuesta a la inicial. Así vemos que el motor trabaja por impulsos sucesivos, no percibidos por el usuario de la máquina, debido a la inercia del rotor. La velocidad de este tipo de motor alcanza hasta 8.000 revoluciones por segundo.

C U E S T I O N A R I O

- 1) *¿A qué debe su denominación el motor universal?*
- 2) *¿Por qué el motor de c.c. de tipo en serie, semejante al universal, no funciona bien cuando se alimenta con corriente alterna?*
- 3) *¿Cómo puede reducirse la reluctancia en un motor universal?*
- 4) *Explíquese cómo pueden mantenerse la reluctancia de un motor universal con valores bajos.*
- 5) *Si el motor universal trabaja con impulsos sucesivos de corriente, ¿por qué no se perciben las variaciones de velocidad?*
- 6) *¿Cuál es la expresión de la velocidad en un motor universal?*

Mantenimiento y fallos en los aparatos eléctricos

9.1. GENERADORES.

La instalación de un generador se hace normalmente con carácter permanente, lo que significa que, una vez montado y en funcionamiento, el mantenimiento de la máquina se reduce a una revisión periódica de la lubricación de los cojinetes. En cuanto a las conexiones eléctricas, también son permanentes, no debiendo alterarse, pues cualquier modificación puede originar problemas en el funcionamiento del generador.

Por ejemplo, si invertimos el campo de un generador autoexcitado, el magnetismo residual de la máquina se anulará y no tendrá excitación, aun cuando se corrija el error. En estas condiciones, la tensión en los bornes de salida de la máquina será nula, siendo necesario crear de nuevo un pequeño campo residual para que pueda restablecerse el funcionamiento normal del aparato.

El magnetismo residual puede obtenerse de nuevo aplicando a los campos del generador una corriente continua suministrada por una batería. El tiempo de aplicación de esta corriente debe ser breve, no habiendo así peligro de que se quemen los devanados a causa de la circulación de una corriente elevada.

A veces es necesario cambiar la polaridad de un generador de c.c., operación que debe hacerse en los bornes de salida y nunca en los del

campo. La mayor parte de los generadores de gran potencia tienen en la carcasa una caja donde están dispuestos los bornes de las diferentes bobinas. Esto facilita bastante el trabajo de verificación del funcionamiento de la unidad, y, volvemos a decir, no debe servir para modificar las conexiones.

9.2. BUJES Y RODAMIENTOS.

Todos los generadores y motores eléctricos que vamos a estudiar bajo un aspecto general, por tener características constructivas semejantes, son máquinas giratorias, cuya rotación se produce alrededor de un eje apoyado en cojinetes que pueden ser bujes o rodamientos. Por tanto, desde el punto de vista económico, es conveniente realizar periódicamente un buen mantenimiento de los cojinetes para conseguir un perfecto funcionamiento del aparato. Con los cojinetes en buenas condiciones, el aparato puede funcionar suavemente, sin ruidos ni dificultades.

Cuando se descuida el mantenimiento y la lubricación de la máquina, los cojinetes se desgastan y, en funcionamiento, hay ruidos y se produce el quemado, llegando incluso, en casos extremos, a no funcionar la máquina.

Como hemos dicho anteriormente, hay dos tipos de cojinetes: los bujes y los rodamientos que pueden ser de bolas o de rodillos. Los bujes normalmente se construyen con tiras de metal antifricción, si bien en los motores relativamente antiguos aún se encuentran bujes fabricados con bronce fosforoso.

El buje consiste en una camisa metálica, en el interior de la cual gira el eje del motor. Teóricamente, el eje debe girar sobre una película de aceite existente entre él y el buje, y en la práctica debe cumplirse este requisito para evitar el desgaste, por falta de lubricación en las partes rozantes. Las partículas metálicas desprendidas de los bujes quedan atrapadas en el eje, produciendo una acción abrasiva que desgasta continuamente las partes buenas del eje, terminando por imposibilitar el funcionamiento de la máquina.

Todos los motores y generadores cuyos ejes se apoyan en bujes, llevan en los extremos de la carcasa un dispositivo de lubricación que debe observarse periódicamente (fig. 9-1). Una buena lubrica-

ción de los cojinetes evita problemas que, a veces, pueden afectar a la parte eléctrica de la máquina.

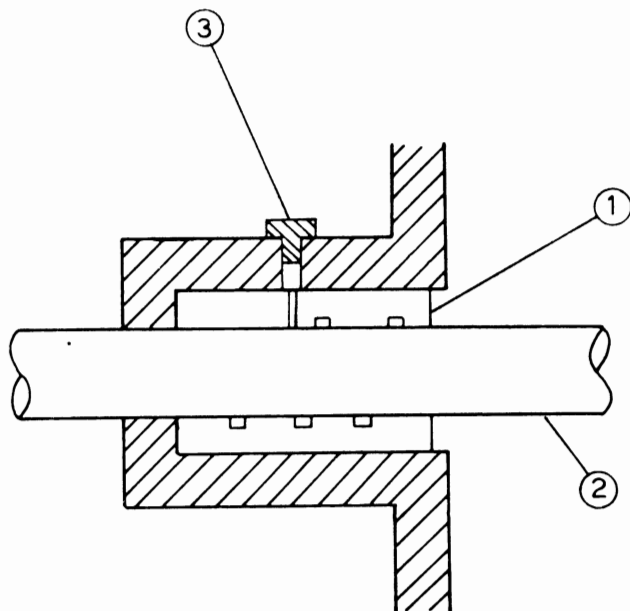


Fig. 9-1. — Cojinete lubricado con aceite.

- 1 — Cojinete.
- 2 — Eje.
- 3 — Entrada de aceite

En la actualidad, hay muchas máquinas rotatorias, especialmente las de pequeñas dimensiones y alta velocidad, dotadas de bujes autolubrificados. Dichos bujes se fabrican con una aleación metálica antifricción con elevado contenido de aceite, y el proceso de fabricación consiste en someter partículas de la aleación a presiones elevadas, inyectándose el aceite en los poros, también a presión. Al quemarse durante el funcionamiento de la máquina, el buje desprende el aceite, proporcionando así una lubricación continua.

Los rodamientos de bolas son sistemas que se fundan en la rotación de unas bolas de acero pulidas, como se ilustra en la figura 9-2, sobre dos guías también de acero, en forma de anillos, re-

duciendo al mínimo el roce. Las bolas están separadas entre sí por elementos de acero que las mantienen siempre con la misma posición relativa.

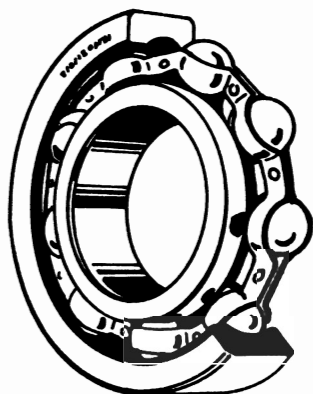


Fig. 9.2.—Sistema de rodamiento de bolas.

Las superficies por las que ruedan las bolas deben estar siempre libres de suciedad y de polvo, materias que actúan como abrasivo, determinando el desgaste prematuro del cojinete. Por ello los rodamientos de bolas deben estar siempre sumergidos en una grasa especial, que lubrifica y evita la entrada de suciedad. No deben emplearse lubricantes comunes, pues una lubricación incorrecta es tan perjudicial como la falta absoluta de lubricación.

Todos los que se inician en el mantenimiento de los motores suponen, equivocadamente, que para que la lubricación o el engrase estén bien hechos deben hacerse con una cantidad excesiva de aceite o de grasa. Por el contrario, este trabajo debe efectuarse de tal forma que no haya exceso de lubricante, que podría penetrar en el rotor o en el campo, causando daños al colector y a las escobillas.

Cuando en una caja de rodamientos existe grasa en exceso, ésta se comprime, calentándose o descomponiéndose, o sea, quemándose. En este caso, los rodamientos se dañan con mayor rapidez que si estuvieran secos. La mayoría de los fabricantes indica el tipo adecuado de lubricante para sus máquinas, siendo muy importante utilizar el tipo apropiado para evitar la inutilización de los cojinetes.

Otro error que los principiantes cometen con frecuencia es el de realizar la lubricación de los cojinetes cuando producen ruidos o recalentamiento en la máquina. Ambos síntomas pueden ser causados por falta de lubricación, pero, a veces se deben a desgaste o descentrado de las cubiertas del motor, lo que puede ocurrir si la máquina se desmonta para el almacenaje.

En los motores pequeños, especialmente en las máquinas-herramientas portátiles, los ruidos o el recalentamiento pueden atribuirse a un eje alabeado o a un choque mecánico sufrido por la máquina. Por eso, sacamos la conclusión de que es prudente evitar la lubricación cuando no se conocen las causas reales de los fallos. La técnica generalmente empleada en estos casos consiste en realizar una inspección visual del estado del eje y de los cojinetes, así como de la grasa y del aceite que lubrica los cojinetes, procurando observar la posible existencia de partículas metálicas, indicadoras de un desgaste ya en estado avanzado.

9.3. MANTENIMIENTO Y FALLOS EN LAS ESCOBILLAS Y COLECTORES.

En las máquinas de corriente continua y en las universales, los principales causantes de defectos son los colectores y las escobillas. Ya vimos anteriormente que el colector es un sistema aislado eléctricamente del eje, y compuesto por conmutadores igualmente aislados entre sí. En los conmutadores rozan continuamente las escobillas y el roce produce el desgaste de ambas partes, depositándose las partículas de carbón de las escobillas en las ranuras de los colectores aislados con mica, llegando incluso a poner las delgas en cortocircuito.

La acumulación de carbón en las ranuras y el desgaste del colector provocan una conmutación imperfecta, lo que puede comprobarse por la producción de gran cantidad de chispas, lo cual contribuye a acelerar aún más la destrucción del colector. La conmutación sólo se hará correctamente cuando el contacto entre el colector y las escobillas sea continuo.

De lo que acabamos de exponer se deduce que periódicamente se debe realizar una buena limpieza del colector, siendo aconsejable prestar una atención permanente al centrado de las escobillas en el colec-

tor, y también a su configuración, para que se apoyen correctamente en él. El colector, cuando se encuentra en buen estado, es suave al tacto, está libre de asperezas y no produce chispas debajo de las escobillas.

Ya se ha dicho que las escobillas de carbón están en contacto continuo con el colector, debido a la presión que sobre él ejercen los muelles situados en la parte superior de la caja. Cuando la presión de los muelles es pequeña, el contacto es deficiente y los efectos observados ya han sido analizados. Cuando percibamos en el colector una cantidad excesiva de chispas, no provocadas por posición incorrecta de las escobillas, deberemos revisarlo cuidadosamente y verificar el funcionamiento general de la máquina.

Debemos tener en cuenta que el exceso de chispas no lo produce solamente un mal contacto en la conmutación, sino que puede deberse a cortocircuitos parciales en las bobinas del inducido. Así, siempre es conveniente desconectar la máquina y observar si la posición de las escobillas es correcta. Para que así ocurra, es preciso que éstas estén situadas diametralmente opuestas.

En las máquinas de gran tamaño, la posición de las escobillas puede regularse para que se realice una conmutación perfecta. Puede suceder entonces que los tornillos que fijan los portaescobillas se aflojen y se desplacen de su posición correcta, dando origen a gran cantidad de chispas. En este caso, para corregir el defecto es preciso ajustar las escobillas en su posición primitiva.

Si las escobillas estuvieran muy gastadas deberán cambiarse, pero al realizar el cambio debe tenerse cuidado de que el material de las nuevas escobillas sea el mismo y que tenga la misma dureza que el de las originales. Al colocar una escobilla nueva, la cara en contacto con el colector no se apoyará totalmente sobre éste. Para evitar un apoyo tangencial, no completo, se procederá como se ilustra en la figura 9-3, con la escobilla en posición, presionada por el muelle, se colocará debajo del carbón un papel de lija muy fina con el abrasivo vuelto hacia el carbón y se realizará un movimiento de vaivén para desgastar la superficie de la escobilla.

Cuando el colector presente muchas irregularidades o esté muy sucio, se abrirá el motor, se extraerá el inducido y se procederá a una limpieza o reparación del colector. Si las irregularidades no fueran muy profundas se podrá corregir el defecto poniendo el in-

ducido en un torno con el fin de pulir la superficie del colector. Este pulido no debe realizarse con papel de esmeril, sino con papel de lija, a ser posible fino; si las irregularidades fueran muy profundas, el inducido se pondrá en un torno, trabajándose en el colector con una herramienta apropiada, teniendo siempre cuidado de no eliminar una cantidad innecesaria de material.

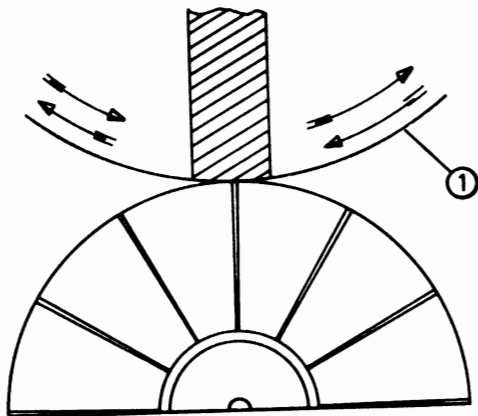


Fig. 9-3.—Ajuste de una nueva escobilla en el colector.

En cualquiera de los casos anteriores, una vez concluido el pulido del colector, deberán limpiarse los espacios existentes entre los conmutadores para eliminar todo el polvo o material acumulado, lo cual puede hacerse con unas sierras especiales que sirven para rebajar la mica que se utiliza como aislante. La sierra debe manejarse apoyándola suavemente en la mica, efectuando un movimiento de vaivén como si se la estuviera cortando.

Deberá tenerse cuidado de no profundizar mucho en la mica, ya que un canal profundo constituye un excelente depósito para el carbón desprendido de las escobillas, poniendo, además, los conmutadores rápidamente en cortocircuito. Una vez concluida la limpieza de las ranuras, será necesaria una nueva «pasada» de papel de lija para reducir las asperezas que puedan haber aparecido durante esta última operación.

9.4. VERIFICACION DEL AISLAMIENTO.

Entiéndese por aislamiento de un motor o generador la resistencia entre los devanados del inducido y de los campos en relación con la carcasa de la máquina. En esta resistencia están incluidas, entre otras, las que se refieren al soporte de las escobillas y de las cajas de bornes.

Con el funcionamiento de la máquina, la acumulación de polvo, el continuo calentamiento de los devanados a causa de la circulación de corriente, las variaciones de la temperatura ambiente y la absorción de humedad hacen que esta resistencia disminuya paulatinamente, dando origen a lo que se denomina *fugas de aislamiento*. Al principio, estas fugas son pequeñas, pero después van aumentando hasta que los devanados se ponen en cortocircuito con la carcasa. Esto no sólo constituye un peligro para la máquina, sino también, principalmente, para sus operadores, razón por la cual la carcasa de toda máquina eléctrica deberá estar sólidamente conectada a masa.

Una de las verificaciones que deben hacerse por parte de quienes trabajan con máquinas eléctricas —motores o generadores— es el aislamiento de los devanados respecto a la carcasa. En condiciones normales, este aislamiento debe ser siempre infinito, o, por lo menos, de un valor tan elevado que las fugas puedan considerarse despreciables.

La verificación del aislamiento de los devanados se realiza con óhmetros especiales de alta tensión. Esta comprobación también puede realizarse eventualmente con un óhmetro común, si bien no sea del todo aconsejable, porque en la mayor parte de los casos la pérdida de aislamiento de los devanados sólo se percibe cuando éstos se someten a una tensión elevada, y no cuando se los somete a una comprobación con el óhmetro de baja tensión.

En la figura 9-4 vemos el circuito de un óhmetro de alta tensión. Este aparato, que también se conoce por la denominación de «megger», consiste en una dinamo o magneto de acción manual, capaz de generar una tensión de 500 V, que se aplica al circuito que se prueba. En serie con el circuito queda conectado el instrumento indicador del «megger», que mide la corriente de fugas del circuito y se calibra directamente en megohmios.

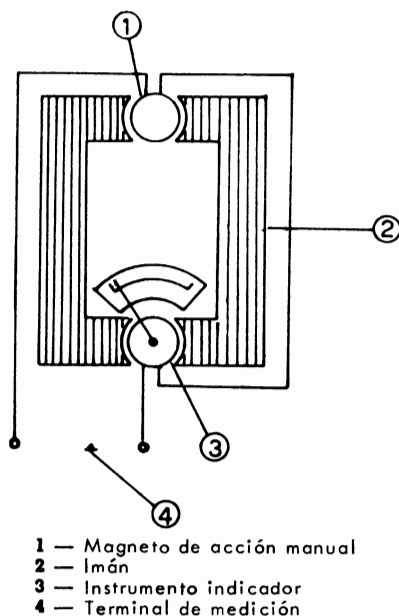


Fig. 9-4.—Circuito de un óhmetro de alta tensión o "megger".

Para efectuar mediciones con el aparato, la máquina debe desconectarse de la línea, y, a ser posible, de toda instalación de la cual la máquina forme parte, para evitar indicaciones falsas. En la figura 9-5 se muestra la forma en que deben hacerse las conexiones del «megger» a la máquina para la verificación de la resistencia de aislamiento. Una vez hechas las conexiones se girará la manivela del aparato, leyendo en la escala el valor del aislamiento.

Si el valor del aislamiento leído fuera de varios megohmios, la máquina estará en buenas condiciones a este respecto. No obstante, si el aislamiento fuera inferior a $1\text{ M}\Omega$, será necesario proceder a una revisión más minuciosa, para localizar un lugar de bajo aislamiento; en este caso, es conveniente dejar libres las conexiones de la caja y quitarlas.

Una prueba idéntica deberá realizarse en los portaescobillas. Deberán separarse las bobinas del campo y del inducido, verificándose separada y aisladamente de cada una de ellas, pues puede suceder que el fallo del aislamiento sólo se manifieste en uno de los devana-

dos. Si no se dispusiera de un «megger» la verificación podrá hacerse como se indica en la figura 9-6, en la que se emplea un polímetro conectado en serie con una fuente que suministra una tensión continua comprendida entre 200 y 500 V. Como en el caso anterior, la máquina se desconectará de cualquier otro circuito externo durante la prueba.

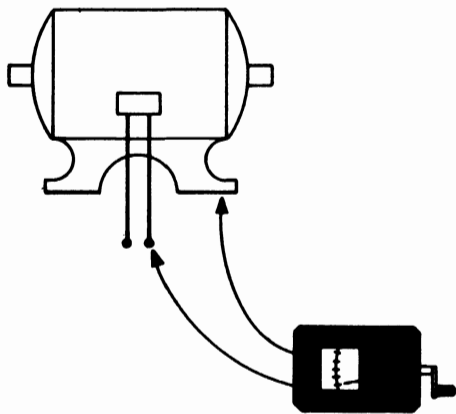
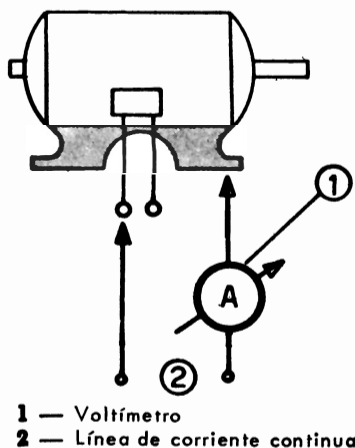


Fig. 9-5.—Medición de la resistencia de aislamiento con un óhmetro de alta tensión.

Fig. 9-6.—Medición de la resistencia de aislamiento con el auxilio de un polímetro en una escala de corriente.



El polímetro, al comienzo de la operación, deberá ponerse en las escalas más elevadas de corriente, para evitar que el aparato pueda quemarse a causa de fugas muy intensas. Una vez comprobado que

la corriente de fugas es baja, podrá ajustarse para las escalas de lectura más baja, hasta que la corriente pueda leerse con suficiente precisión.

Conociendo la corriente de fuga y el valor de la tensión aplicada al circuito, se puede calcular la resistencia de aislamiento aplicando la ley de Ohm.

Supongamos, por ejemplo, que utilizamos una fuente de tensión continua de 400 V, y que el instrumento indica una corriente de fuga de 200 μ A, o sea, 0,0002 A. En este caso, la resistencia de fuga medida será de:

$$R = \frac{E}{I} = \frac{400}{0,0002} = 2.000.000 \text{ ohmios} = 2 \text{ M}\Omega.$$

Esta resistencia de 2 M Ω es bastante alta, y podemos considerar bueno el aislamiento de la máquina. Si fuese baja, por ejemplo, del orden de 100 k Ω , no podríamos decir otro tanto, y en este caso, la medida indicaría una corriente de:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{400}{100.000} = 0,004 \text{ A} = 4 \text{ mA}.$$

Si el instrumento de medida estuviera en una escala de microamperios, al circular por él esa corriente de 4 mA, podría quemarse. Por eso se aconseja que se coloque el instrumento, al comienzo de la prueba, en la escala más alta de corriente de que se pueda disponer.

Una vez verificado el aislamiento de los devanados, si fuera bajo, será preciso determinar la razón de la fuga de corriente. Para ello, lo primero que habrá que hacer es desmontar el motor o generador para la verificación visual del estado de los devanados. Por tanto, antes de nada será preciso hacer una buena limpieza de los devanados, retirando la suciedad acumulada con un chorro de aire comprimido bien seco y con una aspiradora de polvo.

La verificación visual permitirá observar si es bueno el estado del aislamiento de los conductores. Si estuviera reseco, la pérdida de aislamiento podría atribuirse a exceso de calentamiento o a penetración de humedad en los devanados de la máquina. Cuando el aislamiento llegue a valores muy bajos, menores de 100.000 ohmios, todo

el devanado del motor habrá de verificarse. En caso de que el aislamiento esté alrededor de 1 MΩ, la máquina deberá desmontarse, limpiarse los devanados y ponerlos a secar para eliminar la humedad, lo cual podría realizarse en un horno o mediante exposición a radiaciones infrarrojas, especialmente tratándose de máquinas de gran tamaño.

La medida de la resistencia de aislamiento con el motor caliente puede darnos la indicación de si las fugas se deben a absorción de humedad, porque en este caso la resistencia de aislamiento aumenta. Si, no obstante, permaneciera igual o inferior a 100.000 Ω, probablemente el fallo será debido al deterioro o rotura del material aislante, siendo aconsejable el rebobinado de la máquina.

Si el motor presentara mayor resistencia de aislamiento en esta prueba en caliente, habrá que barnizarlo cuando se enfríe para evitar ulteriores absorciones de humedad. El barniz empleado habrá de ser apropiado para devanados, con buenas características aislantes.

Cuando se trate de máquinas de pequeñas dimensiones, será conveniente sumergir el estator o el inducido, según proceda, en el baño de barniz para que la impregnación sea total. El tiempo de duración del baño de inmersión no debe ser corto, para que pueda salir el aire interior del devanado. Después del baño se dejará escurrir el barniz, y entonces se introducirá el elemento en un horno, para que se seque. Posteriormente se eliminará el barniz de las partes en las que no sea necesario.

CUESTIONARIO

- 1) *¿Qué sucede si se invierte el campo de un generador?*
- 2) *¿Cómo puede obtenerse nuevamente el magnetismo residual de los campos de un generador?*
- 3) *¿Dónde deben realizarse las inversiones de polaridad en un generador?*
- 4) *¿Cuáles son los tipos de rodamientos utilizados en las máquinas eléctricas?*
- 5) *¿Cómo se construyen los bujes autolubrificados?*
- 6) *¿Cómo puede verificarse el desgaste del colector?*
- 7) *¿Cuándo se hace correctamente la conmutación?*
- 8) *¿Con qué aparato se realiza la verificación del aislamiento de las máquinas eléctricas?*

Resumen de fallos en los motores eléctricos

En el presente capítulo se hará un breve resumen de los fallos que pueden presentarse en los motores eléctricos.

10.1. EL MOTOR NO ARRANCA.

La primera comprobación que el técnico debe realizar es ver si la red de alimentación tiene la tensión correcta o si la tensión es nula. Para ello basta con hacer una medida, con ayuda de un voltímetro, en los bornes de entrada del motor. Esta comprobación es necesaria, porque una tensión muy por debajo de la nominal, provocada por caídas de tensión en la línea de alimentación, puede impedir el arranque del motor.

Si la tensión de alimentación es correcta y el motor no arranca, la causa puede atribuirse a fallo mecánico, que puede ser de origen interno o externo. Como se ha visto anteriormente, la falta de lubricación de los cojinetes puede dificultar el movimiento del motor, impidiendo la rotación del eje. Las causas externas pueden ser una carga excesiva para la potencia del motor, un mal acoplamiento entre el motor y la carga o alguna otra conexión externa mal hecha, si la hubiera.

Generalmente, en los casos en los que el motor no arranca debido a fallo o avería mecánicos, se produce un intenso zumbido, que in-

dica que los devanados de la máquina están siendo recorridos por una corriente elevada. En este caso, la alimentación del motor se deberá interrumpir inmediatamente, so pena de que los devanados se quemen.

En los motores de poca potencia, un defecto que implique el arranque podrá comprobarse rápidamente separando la máquina de todo elemento acoplado mecánicamente a su eje. Si el rotor puede girarse fácilmente por impulso manual, es probable que el fallo sea eléctrico, en cuyo caso deberá hacerse un análisis más minucioso del circuito eléctrico del motor, para lo cual se deberá disponer de un amperímetro (fig. 10-1), para comprobar el consumo del motor.

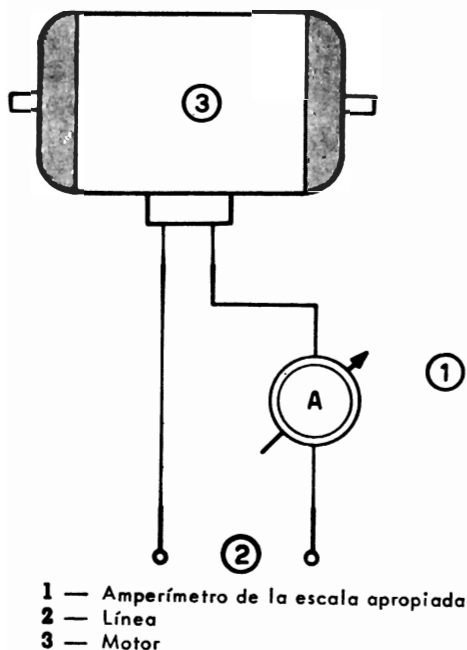


Fig. 10-1.—Esquema para la verificación del consumo de un motor con ayuda de un amperímetro.

En la prueba habrá de tenerse en cuenta que con el motor frenado el consumo de corriente puede alcanzar valores diez veces superiores al consumo nominal, debiendo utilizarse un amperímetro con escala apropiada. La prueba indicará que existe una corriente

circulando por el motor, y el nuevo paso a dar será la determinación del recorrido de dicha corriente.

La resistencia de los devanados del motor deberá medirse a continuación con un óhmetro para bajas resistencias. Después, en condiciones normales, los devanados deberán presentar una resistencia de una fracción de ohmio, sobre todo tratándose de un motor de gran tamaño. En la placa del motor deberá leerse el valor de la resistencia total del estator y del inducido, si éste estuviera devanado, confrontándolo con el valor medido. Podrá realizarse un examen más profundo desmontándose el motor y quitando las soldaduras de las conexiones del estator y del inducido, para medir las resistencias de cada uno de dichos elementos. Esta comprobación es de gran importancia, debido a la posible existencia de bobinas en cortocircuito.

En los motores monofásicos de corriente alterna, la causa más frecuente de defectos en el arranque es el condensador. Si este, por una causa cualquiera, se perforase, daría paso a la corriente por el devanado de arranque, sin con ello proporcionar el desfase necesario entre esa corriente y la que circula por el devanado de trabajo, condición indispensable para que el motor se ponga en marcha. También puede ocurrir que el interruptor centrífugo, o el relé de arranque, no hagan un contacto perfecto, razón por la cual no circulará corriente por el devanado de arranque, permaneciendo el motor parado. En estos motores, cuando el fallo no es mecánico, si el arranque se hace con impulso manual y continúan funcionando normalmente, queda comprobado que el fallo está en uno de los componentes del circuito de arranque.

10.2. TEMPERATURA ELEVADA EN EL MOTOR.

Este es otro defecto que puede ocurrir en un motor eléctrico, causado también por problemas mecánicos y eléctricos. Las causas mecánicas son las mismas citadas en el apartado anterior, siendo por ello necesaria una comprobación de todos los puntos para comprobar si el calentamiento se deberá a alguno de ellos.

Todos los motores eléctricos se recalientan; pero tal recalentamiento no puede ser excesivo, aceptándose como calentamiento normal, dependiendo de la clase de aislamiento del motor, una elevación de temperatura de 30 a 40 grados centígrados por encima de la tem-

peratura ambiente. Una comprobación rápida del calentamiento del motor puede realizarse colocando una mano sobre la carcasa; si se pudiera mantener en esta posición, probablemente es que el motor no se calienta excesivamente.

Un calentamiento anormal, como ya se dijo en otro capítulo, puede reducir bastante la vida útil del motor. En los motores de corriente continua y universales el calentamiento puede tener su causa en cortocircuitos parciales en las bobinas de campo y del inducido, y los métodos para determinar este fallo son los mismos ya mencionados anteriormente.

En los motores monofásicos con arranque por condensador, puede provocarse un calentamiento excesivo al no abrirse el interruptor centrífugo o el relé de arranque. En este caso, lo más común es la explosión del condensador que, como ya se dijo, no ha sido proyectado para quedar continuamente en el circuito. En los motores de fase dividida, en los que el devanado de arranque está constituido por unas cuantas espiras, el calentamiento es muy rápido y fuerte, de modo que si el interruptor centrífugo no se desconecta, podría quemarse el motor si el fallo no se observase inmediatamente.

10.3. RUIDOS ZUMBIDOS Y TREPIDACIONES.

Teóricamente, los motores eléctricos deberían ser absolutamente silenciosos, pero, sin embargo, en la práctica, producen un pequeño ruido debido a las vibraciones, al roce de las escobillas y de los cojinetes y al paso del aire entre el estator y el rotor. Este ruido no es muy perceptible cuando el motor está funcionando en condiciones normales. Sin embargo, cuando el funcionamiento es anormal, se observan fuertes ruidos, zumbidos y trepidaciones, que indican algún defecto en el motor.

Las trepidaciones, como ya se ha indicado, puede deberse a una lubricación deficiente de los cojinetes, y pueden eliminarse revisando la lubricación y, tal vez, sustituyendo los cojinetes. Los zumbidos pueden ser provocados por cortocircuitos en las bobinas, cuando las recorren corrientes elevadas, poniéndose en vibración. En todos los casos, no obstante, debe procederse con criterio para eliminar el defecto, pues los conocimientos técnicos son sólo útiles cuando se aplican debidamente a la solución de un problema.

Podrá apreciarse que los fallos mencionados son de carácter general, pudiendo ocurrir en todo tipo de motor. No se han analizado algunos fallos que van acompañados de síntomas similares a los discutidos, pero puede garantizarse que con el conocimiento adquirido, el lector está en condiciones de determinar la causa del defecto y de proceder a su reparación.

CUESTIONARIO

- 1) *¿Cuál es la principal causa de fallos en el arranque de los motores monofásicos?*
- 2) *¿Qué valores puede alcanzar la corriente en los motores frenados mecánicamente?*
- 3) *¿Cuál es la temperatura normal de un motor eléctrico?*
- 4) *¿Cuando el contacto centrífugo no se desconecta, ¿qué puede ocurrir con el condensador de arranque en un motor monofásico?*
- 5) *¿Cuáles son las causas del ruido en los motores?*

Glosario técnico

Alimentador.—Conductor que lleva corriente de una fuente a un centro distribuidor.

Alternador.—Máquina eléctrica generadora de corriente alterna.

Amperio.—Unidad patrón de intensidad de la corriente eléctrica. Es la corriente producida por una fuerza electromotriz de 1 V en un circuito cuya resistencia es de 1 Ω .

Amperios-vueltas.—Medida de la fuerza de un campo electromagnético, esto es, de la fuerza magnética que resulta del paso de una corriente por las espiras de una bobina. Amperios-vueltas es igual al producto del número de espiras, N , por la corriente I en amperios, o sea, amperios-vueltas = $N \times I$.

Amperímetro.—Instrumento destinado a medir la intensidad de la corriente en amperios.

Anillo colector.—Anillo conductor solidario al rotor y conectado a su arrollamiento, destinado a establecer contacto eléctrico con un circuito externo a través de una o más escobillas.

Angulo eléctrico.—La parte de un ciclo de corriente alterna. El ciclo eléctrico se divide en 360° eléctricos iguales. El ángulo eléctrico es una parte del ciclo y se mide en grados y fracciones

Armadura o inducido.—1) La parte de un motor o generador que encierra el arrollamiento que está conectado a la carga o a la línea. 2) El rotor de un generador. 3) El elemento móvil de cualquier máquina eléctrica.

- Batería.**—Una o varias pilas secas o células secundarias conectadas entre sí para servir a modo de fuente de corriente continua.
- Bobina.**—Un cierto número de espiras de hilo arrollado en un núcleo de hierro o material aislante. Una bobina ofrece considerable oposición al paso de corriente alterna, pero muy poca oposición al paso de la corriente continua.
- Bobina de campo.**—La usada para producir un campo magnético intenso, como en un motor.
- Bobina con núcleo de hierro.**—Una bobina cuyo arrollamiento se hace en un núcleo de hierro, con el fin de aumentar su inducancia.
- Campo eléctrico.**—La región que circunda un cuerpo dotado de carga eléctrica. Las líneas que representan la dirección en que actúa el campo eléctrico en otros cuerpos cargados se denominan líneas de fuerza.
- Campo electromagnético.**—Las líneas de fuerza y el espacio que éstas ocupan alrededor de un electroimán.
- Campo electrostático.**—El espacio ocupado por las líneas de fuerza electrostática entre dos conductores cargados.
- Campo magnético.**—La región que circunda un imán a través del cual actúan las fuerzas magnéticas.
- Condensador.**—Componente electrónico compuesto de dos superficies conductoras, separadas entre sí por medio de una sustancia aislante llamada dieléctrico. Las superficies conductoras se denominan armaduras del condensador. El condensador tiene la capacidad, esto es, la facultad de almacenar carga eléctrica.
- Carga.**—Cualquier elemento del circuito en el que el trabajo sea ejecutado por energía eléctrica.
- Carga eléctrica.**—La presencia de cargas eléctricas en un cuerpo cualquiera.
- Carga inductiva.**—Una carga en la cual la corriente que por ella circula se retrasa en relación con la tensión aplicada.
- Carga negativa.**—Un exceso de electrones en un conductor.

Carga positiva.—Un defecto de electrones en un conductor.

Carga reactiva.—Una carga cuya corriente no está en fase con la tensión aplicada.

Carbón.—Elemento no metálico comúnmente empleado en la fabricación de escobillas para los mecanismos eléctricos. Posee una alta resistencia eléctrica.

Caballo de vapor.—En abreviatura, C.V. o H.P. La potencia necesaria para levantar un peso de 75 kg. a la altura de un metro en un segundo. Un caballo de vapor es igual a 746 vatios.

C.C.—Abreviatura de corriente continua.

Circuito.—El camino seguido por una corriente eléctrica partiendo de sus fuentes, atravesando una serie de conductores y retornando a la fuente.

Circuito abierto.—Un circuito incompleto, que no permite, por tanto, la circulación de corriente.

Circuito compuesto.—Circuito en serie constituido por más de un aparato consumidor de energía eléctrica y su fuente de alimentación.

Circuito en derivación o en paralelo.—Un camino lateral en un circuito eléctrico por donde pasará solamente parte de la corriente.

Circuito cerrado.—Circuito sin interrupción. La corriente electrónica vuelve a su punto de partida sin interrupción de ninguna clase.

Circuito magnético.—El trayecto completo recorrido por las líneas de fuerza magnética.

Circuito en serie.—Un circuito conectado de tal forma que toda la corriente que circula por una parte debe también pasar a través de todas las demás.

Conductor.—Sustancia que permite el paso, con facilidad, de la corriente electrónica. El cobre es el mejor conductor utilizado en electricidad.

Corriente alterna.—Corriente que invierte su dirección a intervalos regulares y cuyo valor medio es igual a cero.

- Corriente continua.**—Corriente que posee la misma polaridad y fluye en una dirección solamente.
- Corriente eléctrica.**—El paso de electrones por un conductor. Puede expresarse en amperios, miliamperios o microamperios.
- Corriente inducida.**—Una corriente producida por las variaciones de un campo magnético en las proximidades de un conductor.
- Cortocircuito.**—Se dice que existe un cortocircuito cuando el circuito se completa a través de un conductor de baja resistencia que ocasiona el paso de una corriente destructiva e impide su paso por las partes donde es necesaria.
- Densidad del flujo magnético.**—El total de líneas de fuerza por unidad de superficie de la sección transversal de un campo.
- Electrodo.**—1) El conductor por el cual una corriente entra o sale de un aparato electrónico. 2) Las placas de una pila secundaria o condensador electrolítico.
- Electroimán.**—Núcleo de hierro dulce que queda fuertemente imantado al circular una corriente por una bobina que lo circunda. El electroimán se utiliza para levantar masas de hierro por la acción magnética y para atraer piezas móviles de hierro en ciertos dispositivos, como relés, por ejemplo.
- Energía.**—La capacidad de producir trabajo. La energía aparece en diversas formas, tales como: energía de movimiento, energía calorífica, energía nuclear o atómica, energía química, energía eléctrica, etc.
- Arrollamiento.**—El hilo que forma una bobina.
- Arrollamiento primario.**—Arrollamiento al que se aplica la energía.
- Arrollamiento secundario.**—Arrollamiento de transformador en el cual fluye una corriente inducida.
- Escobilla.**—Contacto estacionario que se apoya en un anillo del colector o conmutador.
- Espira.**—En una bobina, una vuelta completa de conductor alrededor del núcleo.

Estator.—Parte de la máquina que consiste en los elementos estacionarios del circuito magnético y arrollamientos respectivos.

Excitación.—Teóricamente, la aplicación de corriente o de tensión a un circuito con objeto de obtener un cierto efecto.

Factor de potencia.—La relación entre la resistencia y la impedancia (R/Z) en un circuito de c.a. se conoce como factor de potencia. Una resistencia tiene un factor de potencia igual al 100 por 100. Un condensador tiene un factor de potencia igual al 0 por 100, con un avance de fase, y un inductor (bobina) representa un factor de potencia igual al 0 por 100, con un retraso de fase. Matemáticamente el factor de potencia es igual al coseno del ángulo de fase entre la corriente y la tensión, siendo ambas senoidales.

Flujo magnético.—El número de líneas de fuerzas que atraviesan un circuito magnético.

Fuerza contraelectromotriz.—Potencial eléctrico que se opone a la fuerza electromotriz aplicada a un lado del circuito. Esta fuerza casi siempre se debe a la inducción del circuito, cuando éste tiene propiedades inductivas.

Fuerza electromotriz.—Potencial eléctrico que hace que fluya una corriente eléctrica por un circuito. Su unidad es el voltio.

Fuerza magnetomotriz.—La fuerza que da origen a las líneas de fuerza en un circuito magnético.

Frecuencia.—El número de ciclos completos por segundo de cualquier forma de onda o movimiento ondulatorio.

Fusible.—Dispositivo formado por un hilo de fácil fusión y que está conectado en serie con un circuito cualquiera para interrumpirlo automáticamente cuando se produce una sobrecarga en la línea de alimentación o en el mencionado circuito.

Henrio.—Unidad de inductancia. La inductancia de un circuito en el cual una corriente que varía de intensidad a razón de 1 amperio por segundo, induce una fuerza electromotriz de 1 voltio.

Imán.—Un trozo de hierro o de acero capaz de atraer otro trozo de hierro o de acero.

- Imanes permanentes.**—Una pieza de acero templado, imantado, capaz de conservar sus propiedades magnéticas indefinidamente.
- Impedancia.**—La oposición hallada por la corriente alterna en un circuito. La impedancia es igual a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la resistencia y reactancia del circuito.
- Inducción electromagnética.**—La producción de fuerza electromotriz o tensión en un conductor que corta o es cortado por las líneas de fuerza de un campo magnético. El principio se utiliza en los generadores eléctricos.
- Inducción mutua.**—Inducción electromagnética entre dos circuitos eléctricamente independientes, pero acoplados inductivamente uno al otro.
- Inductancia.**—La propiedad de un circuito de hacer oposición a cualquier variación de la corriente. La propiedad de un circuito de desarrollar una f.c.e.m. cuando circula por él una corriente variable.
- Inductor.**—Dispositivo usado para producir inductancia en un circuito.
- Interruptor.**—1) Un dispositivo para abrir o cerrar las conexiones de un circuito eléctrico. 2) Un dispositivo para producir interrupciones momentáneas de la corriente en un circuito.
- Aislante.**—1) Sustancia no conductora de electricidad. 2) Un componente electrónico usado para aislar un circuito.
- Kilovoltio-Amperio.**—Unidad de potencia aparente en un circuito de c.a. Es igual a 1.000 voltiamperios. Abreviatura: KVA.
- Kilovatio.**—Abreviatura: kW. Equivale a 1.000 vatios.
- Ley de Faraday.**—En todo conductor que corta o es cortado por una cierta cantidad de líneas de fuerza magnética, se induce una fuerza electromotriz.
- Ley de Fleming.**—Indica la dirección que tiene un campo magnético producido por una corriente eléctrica al fluir por un conductor

recto. El conductor se asegura con la mano derecha, de tal forma que el pulgar extendido apunte en el sentido en el que fluyen los electrones. La dirección del campo magnético será la indicada por los dedos restantes.

Ley de Joule.—Indica que la potencia eléctrica en un circuito es igual al producto del cuadrado de la corriente en amperios por la resistencia en ohmios ($W = I^2 \times R$).

Ley de Lenz.—Una fuerza electromotriz producida por la inducción tiende a establecer una corriente cuyo campo se opone al campo primitivo que la produjo.

Ley de Maxwell.—Cuando en una bobina móvil se induce una corriente electrónica, aquella trata de ajustarse de modo que reciba el mayor número posible de líneas de fuerza magnética.

Ley de Ohm para corriente alterna.—La ley fundamental es la misma que la de corriente continua: $I = E/Z$; $E = I \times Z$; $Z = E/I$, en donde I es la corriente en amperios; E , la tensión en voltios, y Z , la impedancia en ohmios.

Ley de Ohm para corriente continua.—Ley eléctrica fundamental que establece que la intensidad de la corriente en cualquier circuito es directamente proporcional a la fuerza electromotriz, e inversamente proporcional a la resistencia, $I = E/R$; $E = I \times R$; $R = E/I$, donde I es la corriente en amperios; E , la tensión en voltios, y R , la resistencia en ohmios.

Líneas de fuerza.—Las líneas de fuerza magnéticas establecidas por un imán permanente, un electroimán o un conductor de energía eléctrica.

Material magnético.—Una sustancia capaz de transformarse en un imán, como el hierro, el acero, etc.

Megohmio.—Unidad de resistencia eléctrica equivalente a un millón de ohmios.

Mica.—Material usado como aislante y que posee constante dieléctrica elevada.

Microfaradio.—La millonésima parte de un faradio.

Miliamperio.—La milésima parte de un amperio.

Miliamperímetro.—Un medidor de corriente calibrado en miliamperios.

Motor de inducción.—Motor en el cual la corriente alterna crea un campo magnético rotatorio en el estator. Este campo magnético rotatorio establece corrientes en los arrollamientos del rotor, y la reacción entre los dos campos causa la rotación.

Motor síncrono.—Un motor de corriente alterna en el cual la velocidad, dentro de ciertos límites, es función sólo de la frecuencia de la tensión aplicada.

Ohmio.—Unidad de resistencia eléctrica. Una resistencia de 1 ohmio permite el paso de una corriente de 1 amperio cuando entre sus terminales existe una diferencia de potencial de 1 voltio.

Pérdida de I^2R .—La energía disipada en forma de calor en la resistencia de un circuito recorrido por una corriente.

Polifásico.—Lo que posee más de una fase.

Polo magnético.—El lugar por donde las líneas de fuerza magnética entran o salen de un imán.

Portaescobillas.—Dispositivo destinado a mantener una o varias escobillas en posición.

Potencia.—Es el trabajo realizado en la unidad de tiempo midiéndose en vatios.

Potencia real.—La potencia efectiva en un circuito de c.a. medida en vatios. Es igual a la potencia aparente (voltiamperios) multiplicada por el factor de potencia del circuito.

Ranura.—Cada una de los entrantes, en el núcleo, destinados a recibir los arrollamientos.

Reactancia.—La oposición a la circulación de una corriente alterna debida a la inductancia de una bobina, la capacitancia de un

condensador o la combinación de inductancia y capacitancia en un circuito. Se mide en ohmios.

Reostato.—Una resistencia variable.

Resistencia.—La oposición a la circulación de la corriente. Se mide en ohmios.

Rotor.—La parte móvil de un motor o generador.

Sincronismo.—La condición en la que un motor de c.a. sustenta una relación inmutable con la frecuencia de la corriente que se le suministra o con otro motor.

Solenoides.—Una bobina de arrollamiento helicoidal y núcleo móvil.

Transformador.—Pieza formada por dos o más bobinas separadas eléctricamente, pero acopladas inductivamente, de manera que una corriente alterna que circule por una de ellas, llamada primario, haga aparecer una fuerza electromotriz en las otras, llamadas secundarios.

Voltio.—La unidad práctica de fuerza electromotriz.

Voltiamperio.—La medida de la potencia aparente de un circuito.

Tensión inducida.—Una tensión producida por la inducción.

Tensión de red.—La tensión en bornes de una línea.

Voltímetro.—Instrumento de elevada resistencia, que sirve para medir la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito.

Vatio.—La unidad de potencia eléctrica.

Vatímetro.—Instrumento destinado a medir la potencia consumida por un circuito eléctrico.

MANUAL BASICO DE MOTORES ELECTRICOS

