

G.- Generadores y motores de corriente alterna

1 - El Generador Sincrónico

El generador común y más usado para corriente alterna ya lo conocemos desde la primera parte (véase primera parte pág. 100 y 101); el mismo es el fundamento del generador de corriente conti-

nua, con la única excepción, de que la construcción del generador de corriente alterna no exige la instalación complicada de un conmutador, sino que se conduce la corriente de la parte móvil al circuito exterior por medio de anillos colectores sobre los cuales rozan las escobillas (fig. 180).

La máquina genera entonces corriente alterna. En el caso más sencillo mostrado en la primera parte corriente alterna monofásica, y es forzoso por esto que la excitación sea siempre excitación separada, porque la corriente de la misma máquina crearía un campo variable. Por esto se excitan estas máquinas con una corriente continua auxiliar. Esta puede sacarse de unos acumuladores, pero el caso común es el trabajo con la llamada excitatriz. Sobre el mismo eje que une la fuente de energía mecánica (chorro de agua, máquina de vapor etc.) con el generador se coloca un pequeño generador de corriente continua, la excitatriz, que entrega enteramente su energía a los imanes del alternador (designación industrial del generador de corriente alterna). El gasto de energía para la excitación es por lo general alrededor del 1% de la energía total.

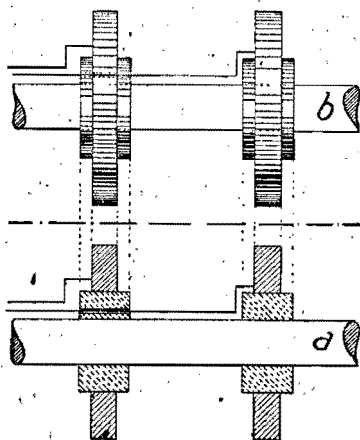


Fig. 180

Una variación nueva para nosotros pero que no afecta el principio fundamental de los generadores es la costumbre de la electrotécnica moderna de instalar las bobinas generadoras como parte fija de la máquina y mover los imanes. Esta variación desde luego no tiene influencia en el funcionamiento, puesto que el movimiento relativo permanece el mismo; pero tiene la gran ventaja de que las corrientes fuertes de los generadores modernos se conducen por un alambre sin interrupción por medio de anillos y escobillas, y la corriente de excitación, que es por lo general corriente de voltaje bajo, pasa por los anillos colectores.

La "corona de polos" que gira en el interior de la máquina con su gran masa sirve a la vez como volante.

La fig. 181 muestra un alternador con su excitatriz G.

También puede colocarse la máquina excitadora en el mismo rotor del generador grande en el caso de que se trate de un tipo de inductor fijo. Entonces tendrá en el rotor dos enrollamientos completamente separados que utilizan el mismo campo magnético: un enrollamiento tendrá su conmutador y servirá para la excitación de los mismos imanes exteriores; el otro enrollamiento que es el principal tendrá sus anillos colectores, y de ellos se sacará la corriente alterna para el circuito externo.

Un dato muy importante es la frecuencia de la corriente generada. Vemos en el generador sencillo de la primera parte pág. 101 que el rotor crea por segundo tantas ondas sinusoidales enteras como revoluciones completas hace. Esto con 1 par de polos. Si tenemos cuatro polos o sea dos pares, entonces el generador creará en cada revolución entera 2 ondas sinusoidales. Tenemos pues, que la frecuencia de la corriente generada es directamente pro-

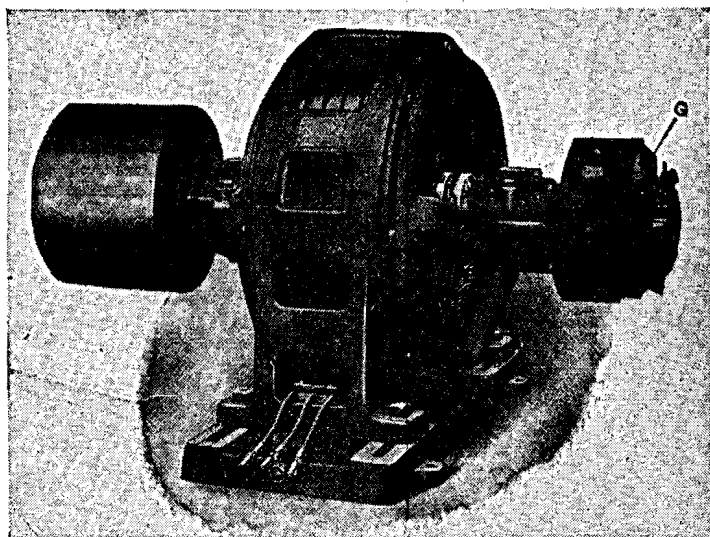


Fig. 181

porcional al número de revoluciones por unidad de tiempo y al número de pares de polos. :

$$f = n' \cdot p$$

donde f = frecuencia = número de ondas por segundo
 n' = número de revoluciones por segundo = $n : 60$ si n es el número de revoluciones por minuto.
 $2 p$ = número total de polos.

La máquina descrita suele llamarse también generador sincrónico, para indicar su relación con el motor sincrónico que veremos más tarde. De una importancia mucho menor es el generador asincrónico que vamos a mencionar cuando estudiemos el motor de igual nombre.

Hasta ahora vimos únicamente la producción de la llamada corriente monofásica. Sin embargo, hoy en día y sobre todo en las centrales grandes, las corrientes alternas que se producen son "polifásicas", instalaciones éstas que ya hemos mencionado someramente en la primera parte (véase primera parte págs. 126 y 127) y que vamos a estudiar con más detenimiento en el próximo capítulo.

2. Corrientes polifásicas

a). El generador sincrónico bifásico y trifásico

La corriente polifásica en el sentido estricto de la palabra es una contradicción en sí. Se dice que un generador produce una corriente polifásica cuando genera varias corrientes monofásicas como las que hemos estudiado, pero desfasadas entre sí.

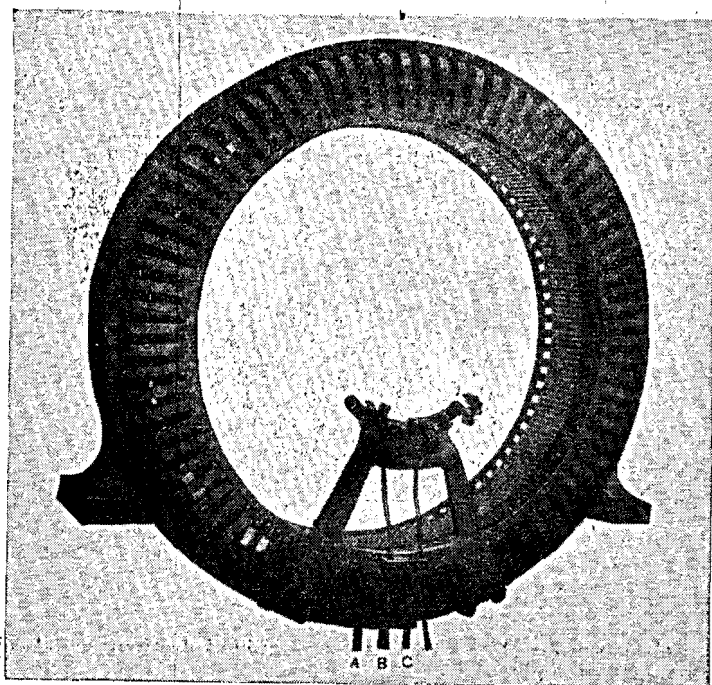


Fig. 182 - Parte fija (Estator) de un generador sincrónico trifásico. Abajo se ven los 4 alambres que vienen de las vueltas generadoras.

La fig. 184 muestra el principio de un alternador difásico con inductores giratorios en el centro de un inducido fijo. El inducido se compone de un anillo de hierro donde van envueltas las bobinas generadoras que están colocadas a 90° una de otra. Además, las bobinas 1 y 2 están montadas en serie y constituyen la fase I cuyos bornes son A y B, mientras que las bobinas 3 y 4 forman la fase II. En el interior del anillo gira un inductor excitado por corriente continua y movido por la máquina motriz. La corriente continua necesaria para la excitación del inductor llega por las escobillas y los anillos colectores B₁ y B₂. Cuando el inductor se encuentra en la posición representada por la fig. 184 las bobinas 1 y 2 cortan un máximo de líneas de fuerza, mientras que las bobinas 3 y 4 no cortan ninguna. De ahora en adelante la inducción en las bobinas 1 y 2 disminuye y empieza a crecer la de las bobinas 3 y 4. Cuando los inductores han girado 90° , en las bobinas 3 y 4 tendremos un máximo de fuerza electromotriz inducida y las bobinas 1 y 2 tendrán una fuerza electromotriz nula. De esta manera tendremos dos curvas de tensión. La fig. 186 representa la variación de tensión para la fase I que, como acabamos de ver, empieza en su valor máximo; y la fig. 187 representa la fase II que, como vimos, empieza en su valor cero y describe como la otra una curva sinusoidal completa. En la fig. 188 hemos representado, por tratarse de un solo generador, a

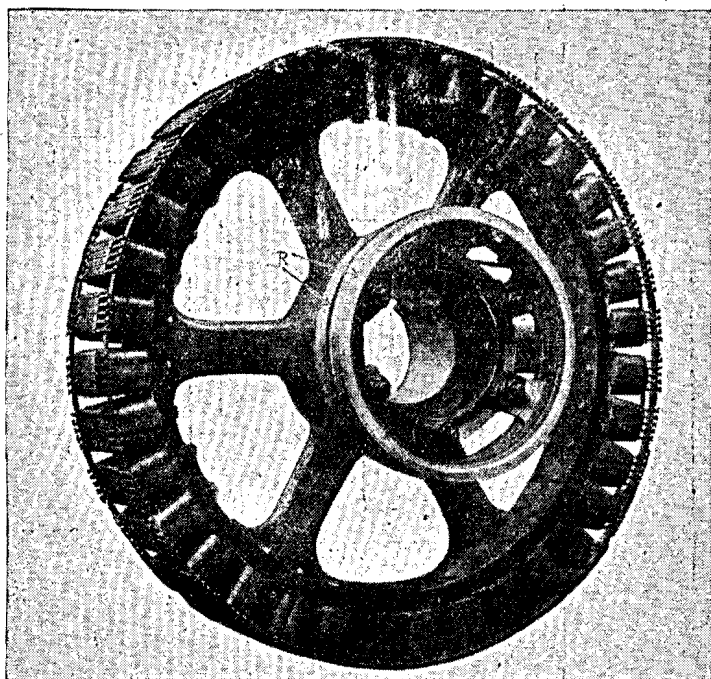


Fig. 185-Parte móvil (Rotor) de un generador sincrónico trifásico. Lleva en su circunferencia los polos norte y sur alternativamente y gira en el interior del estator de la figura 182. La "R" indica los dos anillos de cobre a los cuales se entrega por medio de escobillas la corriente continua de la excitatriz.

la vez las dos curvas. Como se ve, hay entre ellas una diferencia de fase o desfasamiento de 90° . Cuando la tensión de una de estas corrientes es máxima, siempre será nula la otra tensión y recíprocamente. Tal sistema lo podríamos llamar un sistema bifásico con fases distintas. Sin embargo, hay otro sistema que se llama bifásico de fases combinadas. En este se unen a la salida de la máquina dos conductores, uno de cada fase, en una línea común, tal como lo muestra la fig. 185. La importancia técnica de tal instalación la explicaremos más tarde en el capítulo sobre distribución de la corriente eléctrica.

Ya no nos ofrece dificultad entender el funcionamiento de la máquina más importante de la electrotecnia moderna, el generador trifásico. Este generador lo vemos representado en las figs. 181 y 190.

En su construcción es absolutamente análogo a la máquina que acabamos de describir. Las tres corrientes que genera pasan por sus máximos exactamente cada 120° y por consiguiente, presentan el aspecto del gráfico en la fig. 189; otra vez, por tratarse de una sola máquina, dibujámos las tres curvas sobre el mismo eje.

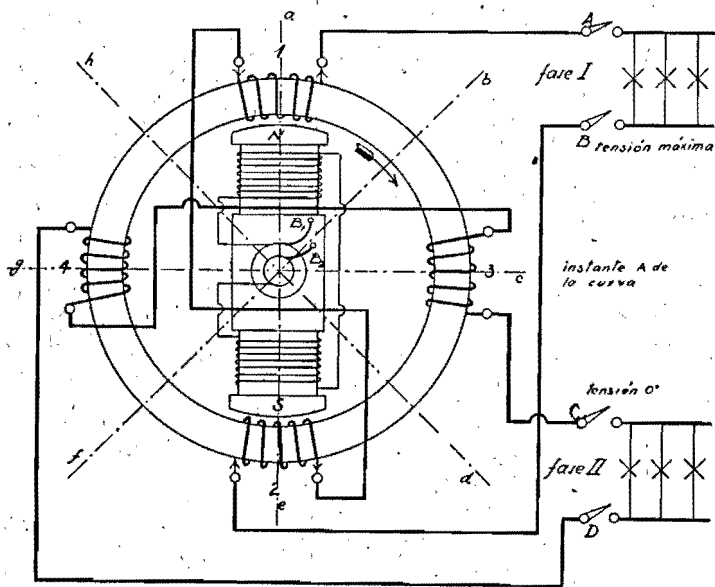


Fig. 184

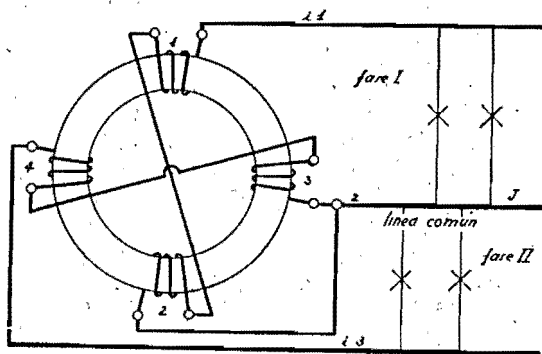
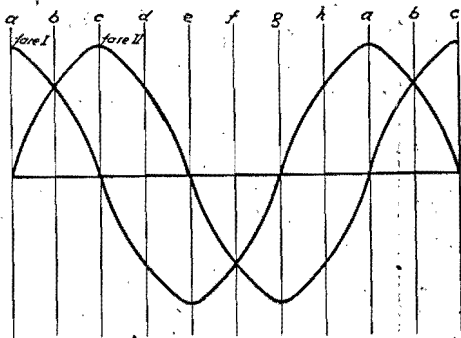
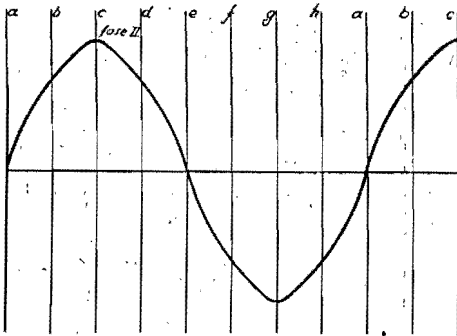
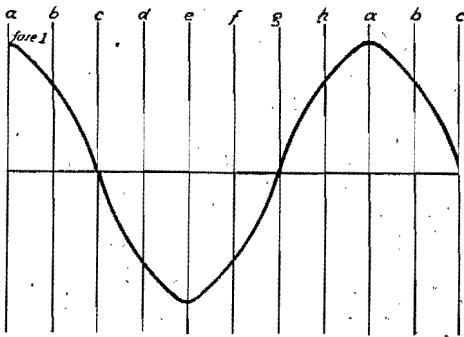


Fig. 185



Figs. 186, 187, 188

El conjunto de corrientes que genera esta máquina llámase corriente trifásica. Este es el sistema de corrientes de más uso en la técnica moderna, sobre todo en instalaciones grandes.

b). Delta y Estrella

El generador, tal como lo hemos mostrado en la fig. 190, no presenta ninguna ventaja especial. Equivale a tres generadores distintos y por esto dibujamos seis alambres, uno para cada fase, para el circuito exterior.

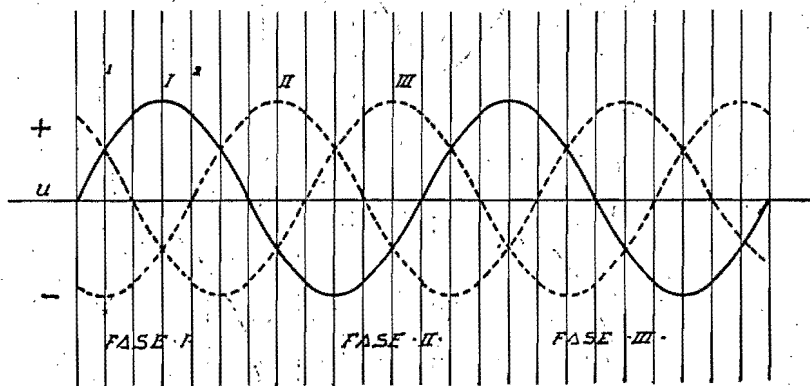


Fig. 189

La ventaja especial que presenta este sistema de corriente y que ha hecho tan extenso su uso, proviene del hecho de poder suprimir tres de los seis alambres exteriores, sin cambiar la esencia del sistema, quedando siempre las tres corrientes aprovechables. Esto sucede con corriente trifásica en la cual las tres corrientes parciales están desfasadas entre sí en 120° , como demostraremos en seguida.

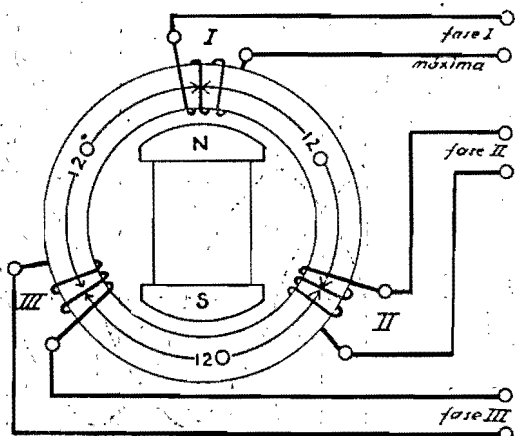


Fig. 190

Ya del mismo gráfico de la figura 189 podemos comprobar que en cualquier momento la suma de las tres intensidades instantáneas de los tres circuitos es cero o lo que es igual, que la suma de dos de ellas es igual a la tercera con signo contrario, hecho que también podemos comprobar matemáticamente. En efecto: la intensidad instantánea para la fase I vale:

$$i_1 = I \cdot \text{sen } \alpha$$

Entonces la intensidad en la fase II es

$$i_2 = I \cdot \text{sen } (120 + \alpha) = I \cdot \text{sen } (60 - \alpha)$$

Y la de la fase III es

$$i_3 = I \cdot \text{sen } (240 + \alpha) = -I \cdot \text{sen } (60 + \alpha)$$

Vamos a sumar dos de estos valores y a mostrar que la suma es igual al negativo del tercero:

por ejemplo, $i_2 + i_3 = I \cdot \text{sen } (60 - \alpha) - I \cdot \text{sen } (60 + \alpha) =$

$$-I \cdot 2 \cdot \text{sen } \frac{2\alpha}{2} \cdot \cos \frac{120}{2} = -I \cdot \text{sen } \alpha = -i_1$$

Ahora consideramos nuestro alternador trifásico como tres alternadores monofásicos, y para entender mejor lo que vamos a explicar los comparamos con tres pilas como las representadas en la figura 191.

Los tres polos positivos de ellas los hemos unido por un conductor sin resistencia e.d. formamos el nudo N_1 . De los tres polos negativos salientes conductores; cada uno de ellos contiene una resistencia R y todos se encuentran en el nudo N_2 . Si comunicamos ahora el

nudo N_1 con el nudo N_2 sucederá que por la unión $N_1 N_2$ pasarán p. e. 6 amperios, si por cada uno de los ramales parciales pasan 2 amperios. Tenemos pues que el cuarto conductor debe ser tres veces más grueso para poder transportar el total de las tres corrientes parciales.

Ahora vamos a hacer la misma cosa con nuestro generador trifásico considerándolo como 3 alternadores monofásicos. La fig. 192 muestra como hemos unido tres terminales de nuestras tres corrientes en

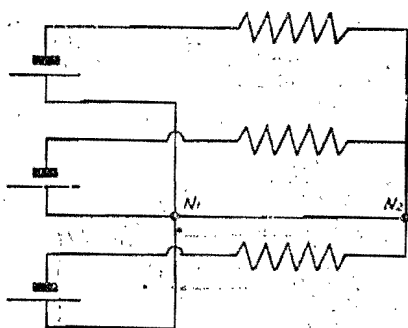


Fig. 191

un nudo N_1 y conducido desde los otros tres terminales tres líneas externas a través de tres conductores (1, 2, 3) hacia un nudo N_2 . La cuarta línea devuelve al generador trifásico la suma de las tres intensidades parciales. Sucede entonces que el cuarto alambre transporta una corriente que, por tratarse aquí de corriente alterna, no tiene valor constante. Existe ahora un caso especial en que el cuarto alambre no transporta corriente, y se presenta cuando se unen

al nudo N_1 los tres principios (o los tres fines) de las tres bobinas y cuando los tres conductores tienen la misma resistencia, porque, como vimos, en este caso la suma de las tres intensidades es igual a 0. Esto lo dibuja el ingeniero esquemáticamente de la manera representada en la fig. 193. Casi siempre hasta se su-

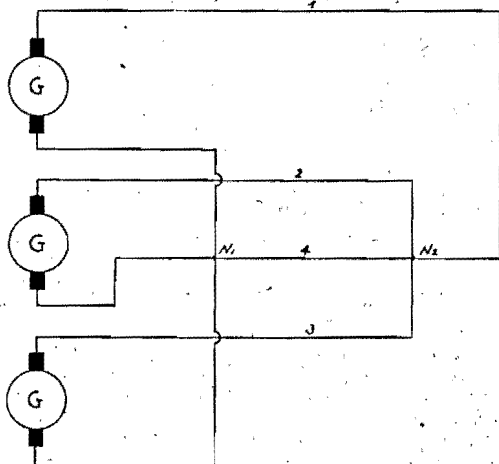


Fig. 192

prime el alambre que une los nudos puesto que él no transporta intensidad. Entonces tenemos entre generador e instalación consumidora las conexiones como lo muestra la fig. 194 que en efecto representa un esquema muy empleado hoy en día.

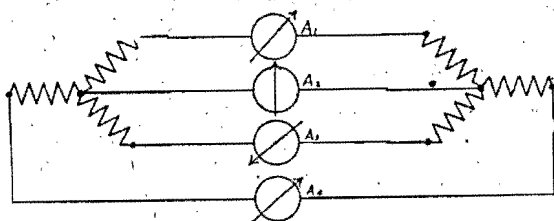


Fig: 193

La bobina generadora 1-2 genera el mismo voltaje que necesita la resistencia consumidora 3-4 y lo mismo sucede con las demás bobinas y resistencias. Desde luego en la bobina 1-2 hay el mismo amperaje que en el alambre 2-3 y la resistencia consumidora 3-4. Puesto que, como ya dijimos, la suma de las intensidades instantáneas en los

tres alambres 2-3, 7-8 y 6-5 en cada momento es igual a 0; podemos decir también que un alambre devuelve siempre al generador la corriente que los otros dos sacan.

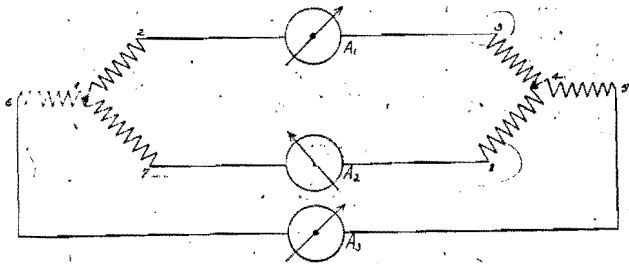


Fig. 194

PREGUNTA. Si intercalamos un amperímetro de alambre incandescente en cada una de las tres líneas y sumamos los valores leídos, ¿qué valor obtendremos? No obtenemos el valor 0 a pesar de lo que acabamos de explicar, porque eso vale para las intensidades instantáneas, pero los instrumentos que usamos no nos dan estos valores. Con ellos determinamos las intensidades efectivas que por supuesto en el caso estudiado por nosotros son iguales. De donde podemos decir que la suma será $3 I_{ef}$. Sin embargo, tratándose de tres corrientes de baja frecuencia (digamos 3 hertz) e intercalando en las tres líneas galvanómetros de escala negativa y positiva (como los amperímetros en los automóviles) será posible observar los tres valores instantáneos y su suma daría 0.

Ahora vamos a investigar lo que indicaría un voltímetro entre los puntos 3 y 8. Este voltaje debe ser distinto del voltaje entre 3 y 4, pero no es la suma de las dos tensiones entre 3 y 4 y entre 4 y 8, por estar estos dos voltajes desfasados entre sí 120° . Como aprendimos, en este caso debemos hacer la suma vectorial. Construimos dos vectores iguales, cada uno igual al voltaje en una bobina y desfasados entre sí en un ángulo de 120° . La diagonal nos da el valor de la tensión buscada y si llamamos la tensión entre 3 y 4 E_f , un cálculo sencillo nos da que la tensión E_l (entre 3 y 8) es igual a $E_f \sqrt{3}$. De manera que si necesitamos tensiones un poco más altas en la instalación consumidora, colocamos las resistencias entre 3 y 8, entre 3 y 5 y entre 5 y 8. Así obtenemos al lado derecho una especie de triángulo, formado por las tres resistencias consumidoras.

Esta misma instalación la podemos hacer con las tres bobinas de nuestro generador trifásico. Obtenemos así un sistema como lo representa la figura 195. En este caso, la tensión entre 1 y 3 otra vez es igual a la entre 4 y 5. De nuevo, la suma de las intensidades en los tres alambres 1-4, 3-5 y 2-6 es igual a 0, también, lo que conduce uno de los conductores es vuelta de lo que llevan los otros dos y las intensidades que muestran los tres amperímetros de alambre incandescente son iguales.

Pero en esta instalación hay una diferencia entre la intensidad de línea y la intensidad de fase como vamos a llamar las intensidades en 1-4 y en 1-3 respectivamente. En este caso, la intensidad de línea es mayor que la intensidad de fase, o sea

$$I_l = I_f \sqrt{3}$$

por quedar dos fases en paralelo entre dos líneas y la tercera. En este caso la intensidad que va por la tercera línea y vuelve por las otras dos

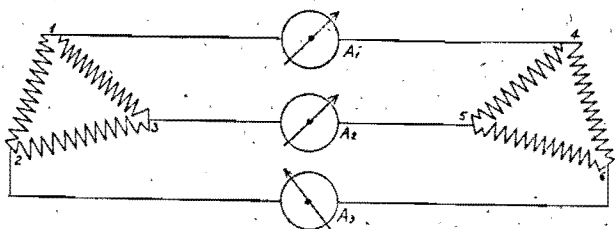


Fig. 195

será la suma vectorial de las intensidades de cada fase. El mismo diagrama vectorial que hicimos antes lo podemos repetir para las intensidades obteniendo el resultado indicado arriba.

En resumen, vemos que podemos transportar, sirviéndonos de tres conductores y empleando dos conexiones distintas, una corriente trifásica equivalente a tres corrientes monofásicas desfasadas entre sí en 120° . En esto precisamente estriba, como dijimos al principio, la gran ventaja práctica de la corriente trifásica.

La conexión mostrada en la figura 194 se llama conexión en estrella o Y (intensidad de fase = intensidad de línea; tensión de línea = $\sqrt{3}$. tensión de fase) y la conexión de la fig. 195 se llama conexión en triángulo o delta (tensión de fase = tensión de línea; intensidad de línea = $\sqrt{3}$. intensidad de fase). Desde luego puede hacerse en el generador la conexión en delta y en el circuito consumidor la conexión en estrella e inversamente.

Lo que acabamos de mostrar vale sólo para el caso de que todo el sistema esté equilibrado e. d. de que las tres resistencias en el circuito consumidor sean iguales. Si no son iguales, las condiciones cambian y en tal caso no puede hacerse caso omiso del cuarto alambre en la conexión de la figura 193 porque entonces este cuarto alambre conduce corriente.

Fácilmente se determina la potencia de un circuito trifásico. Sabemos que la potencia de un circuito monofásico es igual a $e.i. \cos \phi$ que en nuestro caso por tratarse de tres corrientes iguales, la potencia será tres veces mayor o sea $3 e.i. \cos \phi$, en que desde luego i es la intensidad (efectiva) de fase y e la tensión de fase. Si las medidas correspondientes para determinar este valor no se hacen en la fase sino en la línea trifilar como sucede casi siempre, uno de los valores medidos, cualquiera que sea el montaje, será igual al de fase, el otro será $\sqrt{3}$. veces más grande. Por esta razón, escribimos.

$$\text{Potencia} = \sqrt{3} \cdot e' \cdot i' \cdot \cos \phi$$

en que e' , i' son los valores medidos en la línea.

Para la medida de la potencia de una instalación trifásica el ingeniero se vale de varios métodos de los cuales vamos a describir sólo los más usados.

Cuando el generador y la instalación consumidora están conectados en estrella y el transporte de la corriente se hace por medio de cuatro alambres como en la figura 193, no hay dificultad para medir la potencia en el caso de que la instalación esté completamente equilibrada: pues intercalamos sencillamente los bor-

nes de la intensidad de un vatímetro común y corriente (para corriente alterna) en una de las cuatro líneas y conectamos los bornes del voltaje con esta misma línea y el alambre 4 (que une los dos nudos). El valor que nos muestra el vatímetro hay que multiplicarlo por 3 y así obtendremos la potencia de toda la instalación de acuerdo con lo que calculábamos más arriba. Al mismo resultado llegamos, por supuesto, valiéndonos de 3 vatímetros conectados debidamente en las tres fases y sumando los tres valores obtenidos.

En el caso de que la transmisión se haga solo con 3 alambres el último método también puede seguirse pero creando un "nudo artificial". Esta instalación se ve en la figura 196, donde 0 es el nudo artificial y R_1 , R_2 y R_3 son tres reóstatos auxiliares.

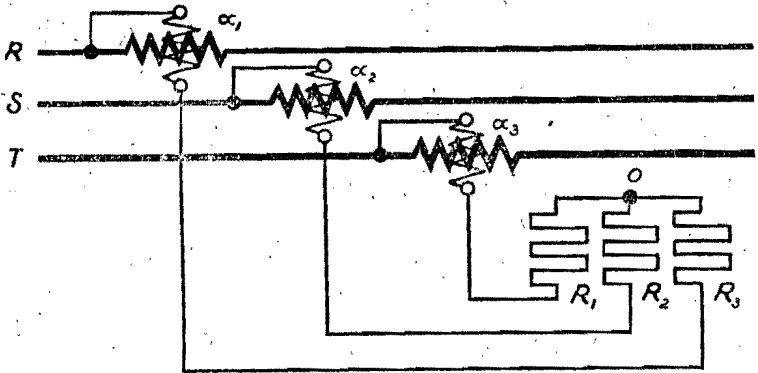


Fig. 196

Esta última instalación la podemos simplificar un poco haciendo la resistencia del voltímetro del instrumento en la línea 2 tan pequeña que éste no indique nada (fig. 197). Entonces toda la potencia de la instalación obra sobre los dos instrumentos restantes o sea la potencia de esta instalación es la suma de las lecturas de los

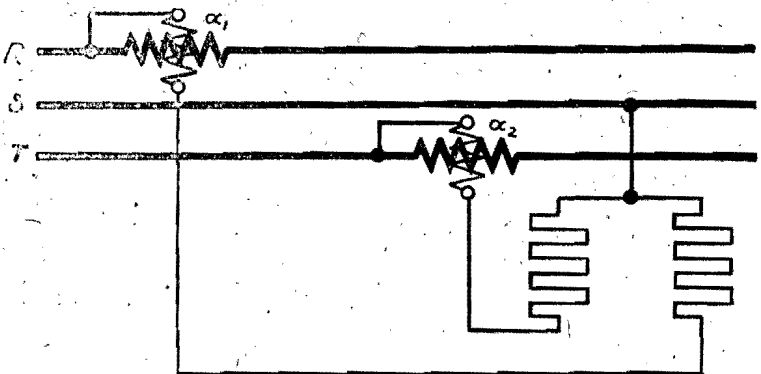


Fig. 197

dos vatímetros monofásicos. Tenemos pues como regla para este método muy usado: intercalar los bornes de los amperios en dos líneas, conectar, de cada aparato, uno de los bornes de los voltios con las mismas líneas respectivamente y conectar los dos bornes de los voltios que quedan libres de los dos instrumentos con la tercera línea.

NOTA: Si uno de los instrumentos no indica nada en la escala, sino que su aguja tiende a oscilar hacia uno y otro lado del cero, basta con cambiar las conexiones en los bornes de los voltios de este instrumento.

El método descrito de los dos vatímetros es el más usado hoy; que sus valores son exactos, lo podemos también comprobar matemáticamente:

potencia de la instalación = $e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3$ donde i y e son los valores de fase. Si agregamos a este valor el valor $e_1 i_2 + e_1 i_3$ y lo restamos a la vez, obtendremos:

$$\text{Potencia} = e_1 (i_1 + i_2 + i_3) - e_1 i_2 - e_1 i_3 + e_2 i_2 + e_3 i_3$$

Ahora bien, sabemos que el valor en el paréntesis es igual a 0. Entonces tendremos:

potencia = $i_2 (e_2 - e_1) + i_3 (e_3 - e_1)$, que es nada más que la expresión matemática para nuestro experimento con los dos vatímetros.

Si la instalación trifásica con tres conductores está bien equilibrada basta por supuesto con un solo vatímetro monofásico y multiplicar su lectura por 2. Sin embargo, hoy se construyen también instrumentos que en una sola caja con un campo de lectura contienen por dentro dos instrumentos, los cuales entonces exigen la conexión como en la figura 197.

Todo lo descrito, para repetirlo otra vez, vale únicamente para la corriente trifásica entre cuyas corrientes parciales hay una diferencia de fase de 120° (esto se sobreentiende si se habla comúnmente de "corriente trifásica").

Claro que p.e. un municipio que en su central produce corriente trifásica, puede vender a los consumidores corriente trifásica y corriente monofásica; lo último sucede con más frecuencia. Las casas compran para su alumbrado únicamente corriente monofásica. Los consumidores de corriente trifásica como tal son algunas veces los dueños de hornos eléctricos trifásicos, pero sobre todo, los dueños de los motores trifásicos que estudiaremos en el siguiente capítulo.

Sobre distribución y transformación de corriente trifásica véanse los capítulos I y K.

✓ 3. - Motores de corriente alterna

a). El motor sincrónico

Ya que conocemos los motores de corriente continua y el alternador sincrónico, no hay dificultad en entender el funcionamiento del motor sincrónico, que es en su construcción idéntico al generador sincrónico, tiene pues, anillos colectores, una máquina excitadora, imanes fijos o imanes móviles etc. etc.

Esta máquina, cuando tiene la misma excitación que el generador correspondiente y las mismas dimensiones en toda su construcción, marca exactamente la misma velocidad que el generador (por eso su nombre).

En efecto, como vemos en la figura 198, en un momento dado, los polos del rotor excitados por la corriente continua, están al frente de

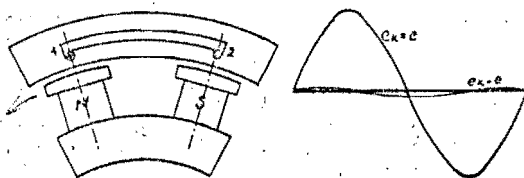


Fig. 198

los conductores 1 y 2, por los que pasa la corriente alterna, que en un cierto instante entra por el conductor 1 y sale por el conductor 2. De acuerdo con la regla de la mano derecha los polos se moverán. Sucede, cuando la corriente alimentadora es alterna, que antes de vencer la inercia del rotor, la corriente cambia de sentido y ejerce una acción contraria permaneciendo el rotor en reposo. Pero si comunicamos al rotor un movimiento inicial, hasta que los polos giren sincrónicamente con la corriente, sucederá que al cambiar el sentido de ésta en las bobinas 1 y 2, habrán cambiado los polos, encontrándose un polo sur al frente de la bobina 1, durante el segundo semiperíodo de la corriente alterna, siendo entonces la fuerza del mismo sentido y sosteniéndose por lo tanto el movimiento con la misma velocidad.

La corriente absorbida, lo mismo que en los motores de corriente continua depende del contravoltaje del motor. Cuando funciona en vacío habrá una corriente nula en el caso ideal, porque al mismo tiempo que la máxima intensidad pasa por las bobinas 1 y 2, se generan las intensidades máximas, considerando el motor como generador, por estar los polos exactamente en frente de los conductores, como se ve en la figura 198. Cuando el motor está cargado, la rueda polar tiende a retrasarse. Sin embargo, la velocidad del motor no puede disminuir, pero los polos no se colocarán en frente de los conductores al mismo tiempo como en el ejemplo anterior sino un poco después de que ha circulado por las bobinas la intensidad máxima. Esto debido a la resistencia que ejerce la carga mecánica sobre el eje. De esto resulta que el contravoltaje que es máximo cuando los polos pasan al frente de los conductores quedará retrasado con respecto a la corriente entregada: contravoltaje y voltaje entregado desfasados, por consiguiente intensidad del circuito alimentador y tensión en él también desfasadas; véase la

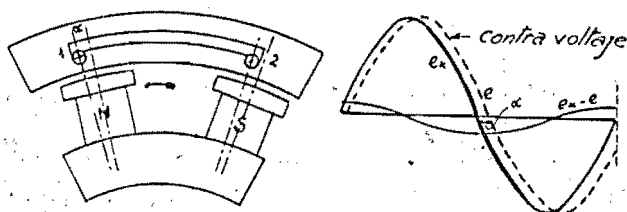


Fig. 199

figura 199 en la cual se ve el crecimiento y desfase de la intensidad del circuito a medida que se desfasan más y más el voltaje entregado y el contravoltaje; lo que es claro por depender esta intensidad de la diferencia de los valores de estos voltajes.

Resulta pues que por ser el desfase en la línea alimentadora proporcional a la carga mecánica, la intensidad absorbida también lo será. Llegamos así a un resultado que hubiéramos podido predecir: que la intensidad del motor crece cuando aumenta la carga mecánica, cosa que ya hemos estudiado con detenimiento en el capítulo sobre motores de corriente continua.

Una carga mecánica excesiva hace el desfase tan grande entre el campo del rotor y el campo creado por el estator que el motor se para. Lo mismo sucede si varía la velocidad del generador porque nuestro motor debido a la inercia no puede acomodarse a ninguna variación.

Veamos a la vez las ventajas y desventajas de este motor: 1^a- su velocidad es constante aunque varíe la carga mecánica, 2^a- necesita aparatos auxiliares para ponerlo en marcha (motor de cualquier naturaleza) y una fuente de corriente continua para los imanes, 3^a- se para en los casos anotados.

En un motor sincrónico en vacío el desfase de que hablamos anteriormente es insignificante como puede verse en la figura 198. Esto sucede cuando la excitación de los imanes es la misma del alternador porque en este caso voltaje máximo y contravoltaje máximo son iguales. Si ahora sobre-excitamos (aumentamos la intensidad de excitación de los imanes) este mismo motor sincrónico en vacío, la mayor fuerza hará que los imanes se adelanten en su paso al frente de las ranuras donde están las bobinas, al instante en que por éstas pasa la corriente máxima. De la misma manera una bajo-excitación desfasará las curvas lo mismo que una sobrecarga. Vemos pues que la sobre-excitación adelanta la fase intensidad contra la fase voltaje (en el circuito alimentador) teniendo así el mismo efecto de un condensador (véase primera parte sobre desfase capacitivo) y que una bajo-excitación, por atrazar la fase intensidad, hace que el motor sincrónico tenga efecto inductivo. Esta propiedad de poder obrar a la voluntad; capacitiva o inductivamente, hace que el motor sincrónico se use en vacío mucho como regulador de fase entendiéndose que regular la fase es poner intensidad y tensión en fase, o hacer, en otras palabras, el factor de potencia igual a 1.

Así mismo, cuando un motor sincrónico, debido a una carga grande, produce un desfase en la línea alimentadora, puede corregirse este inconveniente variando la excitación de él, de manera que es posible mantener siempre voltaje e intensidad en fase en un circuito en que trabaja un motor sincrónico. Esto es una ventaja muy apreciable.

Los motores sincrónicos como motores de trabajo se usan relativamente poco. Se construyen para corriente trifásica y menos para corriente monofásica.

b). El campo giratorio

Para estudiar el llamado campo giratorio, en primer lugar haremos un experimento sencillo. La fig. 200 representa un cilindro giratorio, en el interior del cual hay dos imanes permanentes, que se mueve alrededor de un cilindro de cobre C completamente independiente del primero y que puede girar sobre un eje. Tan pronto como hagamos girar el cilindro de los imanes por medio de la manivela que se ve en la figura, se pondrá en movimiento el cilindro de cobre interior aunque entre los dos no haya ninguna unión mecánica. La explicación es muy clara: en el cilindro interior debido al movimiento

del campo exterior se formarán corrientes de inducción; estas corrientes no salen del cilindro y entonces forman pequeños circuitos que se llaman torbellinos, que polarizan el cilindro de tal manera que al frente de un polo norte se formará un polo sur y viceversa.

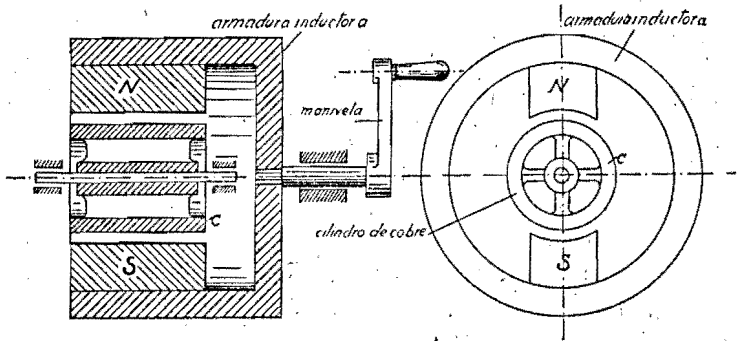


Fig. 200

El resultado de todo esto es la formación de una unión magnética que arrastrará el cilindro interior. De la misma explicación que acabamos de dar deducimos que la velocidad del cilindro interior tiene que ser más pequeña que la del campo inductor. Si fueran iguales, el cilindro de cobre no cortaría líneas de fuerza y no habría inducción ni atracción magnética.

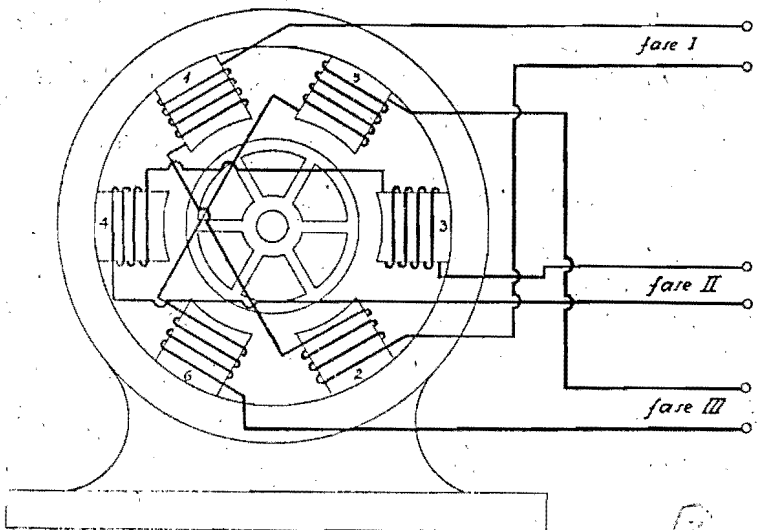


Fig. 201

Vamos en seguida a hacer el mismo experimento, pero con el cilindro exterior fijo. Con este objeto construimos seis polos regularmente repartidos en la circunferencia interior del cilindro (fig. 201). Estos polos se excitan con corriente eléctrica.

Cambiando las conexiones vamos a hacer el polo 1 norte y el 2 sur. En seguida quitamos la corriente de estos dos y hacemos el polo 5 norte y el opuesto sur. Quitamos la corriente de nuevo y hacemos sucesivamente norte los polos 3, 2, 6 y 4 quedando, por supuesto, los opuestos sur. El resultado es absolutamente igual al del experimento anterior; el cilindro central de cobre girará arrastrado por el campo magnético que ha girado. Esta es la razón del nombre campo giratorio, el que gira es el campo magnético, los electro-imanes que lo producen permanecen inmóviles. Sería muy incómodo cambiar continuamente nuestra corriente en los seis electro-imanes de la fig. 201. De este trabajo se encargará la corriente trifásica que estudiámos en uno de los capítulos anteriores. Los polos 1 y 2 se los vamos a recomendar a la primera fase, los 3 y 4 a la segunda, y 6 y 5 a la tercera. Como lo muestra la fig. 201.

Alimentando un par de estas bobinas con corriente alterna, tendremos, si partimos del máximo: primero p.e. un polo norte fuerte, luego más débil, después nada de magnetismo y durante la parte negativa del período un polo sur débil, sur más fuerte etc. etc. Lo mismo sucederá con el próximo par de polos, pero claro que los estados semejantes estarán retrasados un tercio de período. Ciéndonos a la consideración de los polos norte fuertes vemos que primero será polo norte el número 1 después el 5, en seguida el 3 etc. Para entender mejor esto, nos ayuda la fig. 202 en que mostramos gráficamente el estado de los polos durante un pe-

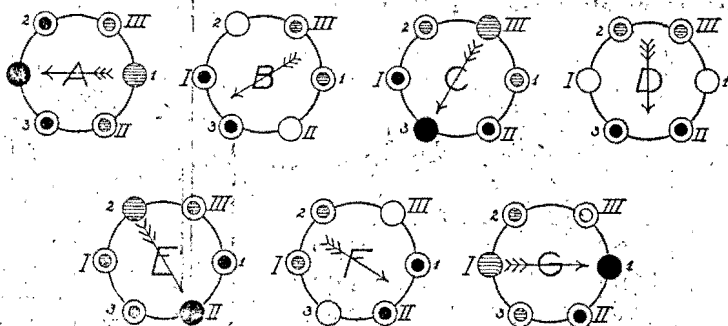


Fig. 202

riodo completo. Un punto negro representa un polo norte, un punto rayado un polo sur, un punto pequeño representará un polo débilmente norte o sur, un círculo vacío indicará que no hay magnetismo. El resto lo dice la figura.

Trabajando con 4 polos y dos corrientes alternas desfasadas entre sí en 90° conseguiremos de una manera análoga un campo giratorio bifásico. Este sería menos eficaz y homogéneo.

c). El motor asincrónico trifásico

La instalación con los seis polos alimentados por corriente trifásica y el cilindro metálico que gira en el interior, se llama motor

asincrónico o motor de inducción. La palabra "asincrónico" tiene origen en el hecho de que la velocidad del campo giratorio y la del rotor tienen que ser distintas por razones que ya hemos mencionado más arriba.

En la práctica, por lo general, no se trabaja con un rotor macizo y homogéneo, sino se le reemplaza por un cilindro de hierro en cuya superficie se encuentran varias barras de cobre, aisladas del núcleo de hierro y cerradas entre sí en corto circuito por dos discos laterales. En estas barras circula una corriente de inducción que polariza el rotor y que en su forma primitiva la estudiamos como corriente de torbellino.

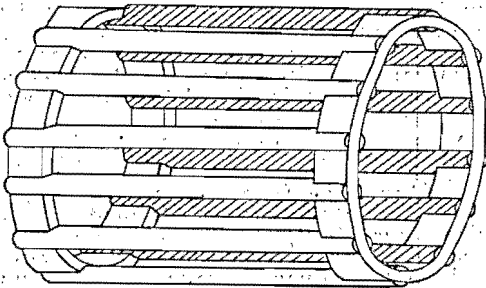


Fig. 203

La figura 203 muestra dicha "jaula" pero sin el hierro que forma el núcleo interior.

Este rotor se mueve pues entre las bobinas alimentadas por la corriente trifásica que crea el campo giratorio. El método anteriormente descrito con el cilindro rotatorio macizo en el interior ya casi no se usa corrientes débiles porque las de

torbellino no son suficientemente eficaces.

Al entregar la corriente a las bobinas exteriores, se produce inmediatamente el campo giratorio y por estar el rotor en reposo, el movimiento relativo de los conductores de la jaula y del campo magnético será máximo, originándose un voltaje muy alto en estos conductores y por consiguiente circulando por ellos la intensidad máxima (el sistema equivale en este caso a un transformador, cuyo secundario está en corto circuito; sobre transformadores véase más tarde). A medida que aumenta la velocidad del rotor, disminuye la velocidad relativa entre el rotor y el campo rotatorio, bajará desde luego el voltaje y la intensidad en los conductores de la jaula. Si fuera posible que el rotor girase a la misma velocidad del campo giratorio, no cortarían líneas de fuerza y no tendría intensidad ni par por consiguiente. Pero como ya vimos en los demás motores, esto no es posible ni prácticamente realizable.

La diferencia de velocidad entre el campo giratorio y el rotor se da en la práctica en forma de porcentaje.

Para determinar la velocidad del campo giratorio nos valemos de la fórmula que dimos en la pág. 137:

Número de revoluciones por segundo $= n' = f : p$, en este caso $2p$ será el número total de polos conectados a una fase. En la figura 201 tenemos en total 6 polos, a cada fase le corresponde un par, de manera que para esta máquina n' es igual a f . Si tuviéramos p.e. en total 18 polos, tendríamos para cada fase 3 pares de polos; lo que daría con una frecuencia de 60 hertz 20 revoluciones por segundo o 1200 p. minuto. Si en este último caso el rotor hiciera 1100 revoluciones por minuto,

$$\text{el resbalamiento sería } \frac{1200 - 1100}{1200} = 0.083 \text{ o sea } 8.3\%$$

El valor de esta disminución o resbalamiento alcanza hasta un 8 % en las máquinas de pequeña potencia. En las de mayor potencia oscila entre 1,5 y 2 %. Cuando los motores funcionan en vacío el resbalamiento es insignificante.

La frecuencia en el rotor no es constante, depende, como sabemos, del movimiento relativo de éste con relación a los inductores. Cuando está quieto el rotor, la frecuencia será igual a la de la corriente (véase más tarde sobre frecuencia en transformadores), porque los conductores del rotor cortan el campo magnético móvil el mismo número de veces dado por la frecuencia. Cuando el rotor hace el mismo número de revoluciones que el campo, la frecuencia en el rotor, por no haber corriente, es 0. Resulta pues que la frecuencia es función del resbalamiento.

PROBLEMA. Tenemos un motor trifásico asincrónico de 4 pares de polos por cada fase y una frecuencia de 50 hertz. Con una cierta carga el resbalamiento vale 4%. Se pregunta el número de revoluciones del campo del rotor y la frecuencia en este último.

Si aplicamos la fórmula para la velocidad del campo, tenemos

$$n' = \frac{50}{4} = 12.5, \text{ o sea}$$

$$n = 12.5 \times 60 = 750 \text{ revoluciones por minuto.}$$

Si el resbalamiento es 4%, la diferencia de velocidad será 30, y el rotor dará 720 revoluciones por minuto.

Para hallar la frecuencia en el rotor sabemos que el campo, suponiendo el rotor quieto, daría 30 revoluciones por minuto, o sea que la velocidad relativa es $n = 30$ o $n' = 0,5$. Este es el dato que necesitamos para aplicar nuestra fórmula para la frecuencia:

$$f = n' \cdot p = 0,5 \cdot 4 = 2 \text{ hertz,}$$

El motor asincrónico, como lo hemos descrito hasta ahora, es una de las máquinas más sencillas y sólidas. La parte móvil se compone únicamente de una jaula de cobre montada sobre un bloque de hierro giratorio. No tiene complicaciones de ninguna clase, especialmente no tiene ni colectores ni escobillas. Esto, por supuesto, es una gran ventaja porque no se pierde energía mecánica debido al rozamiento de las escobillas ni se tienen partes que se desgasten por el uso, como carbones etc. Deplorablemente en el momento de arranque la alta intensidad en el rotor representa un gran inconveniente.

ARRANQUE DE LOS MOTORES ASINCRONICOS DE CAMPO GIRATORIO

CLASE	INTENSIDAD	PAR DE ARRANQUE
	Durante el arranque en relación al normal.	En relación al normal.
Inducido en corto circuito sin dispositivo especial	6	1
Inducido en corto circuito con conexión estrella-triángulo	2	0,4
Inducido en corto circuito con transformador de arranque	1.5	0,25
Inducido con anillos colectores	2	2
Inducido con enrollamiento en oposición	2.5	1

Para corregir esto se ha ideado el motor asincrónico trifásico con embobinado en el rotor, y con reóstato de arranque, tal como lo representa el esquema en la fig. 204.

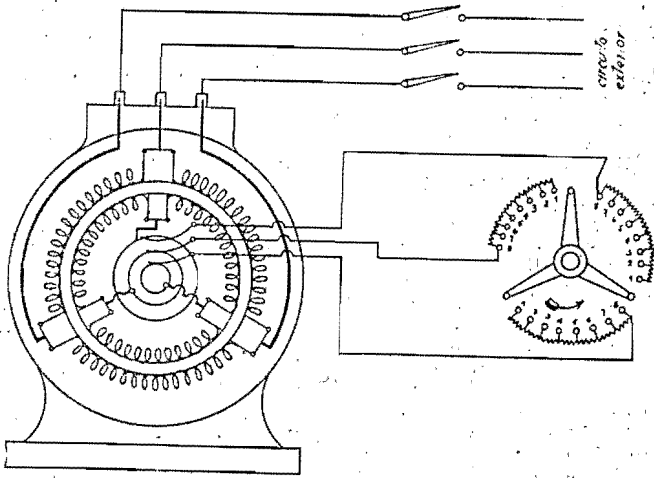


Fig. 204

En ella vemos el estator montado en triángulo y el rotor embobinado también en triángulo (pero con alambre grueso) que por medio de tres anillos colectores y las correspondientes escobillas comunica con una resistencia de arranque especial, que tiene por objeto dismi-

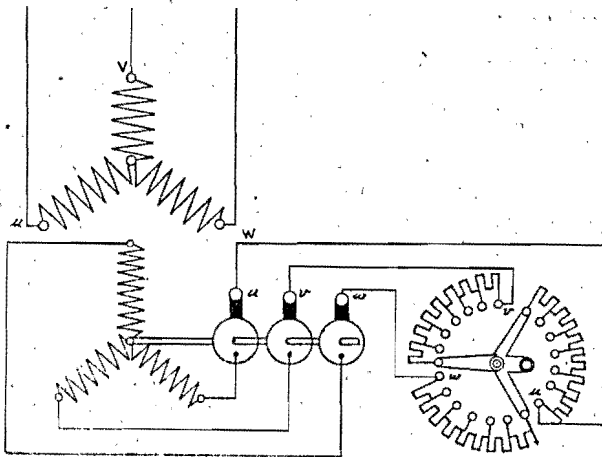


Fig. 205

nuir la intensidad de arranque. A medida que el motor aumenta de velocidad se mueve la palanca en el sentido de la flecha y cuando llega al último punto, el motor tiene su velocidad normal. En este momento, el embobinado del rotor está otra vez en corto circuito y las escobillas, que representan un gasto inútil de energía mecánica, sobran, y pueden suprimirse, lo que se hace en varios motores por medio de un dispositivo que, al mismo tiempo que levanta las escobillas, une los tres anillos para que queden en corto circuito. En algunos casos aprovechase la fuerza centrífuga para hacer esta maniobra completamente automática. A medida que aumenta la velocidad, unos contrapesos debido a la fuerza centrífuga quitan la resistencia auxiliar y cuando la velocidad se hace igual a la normal, queda el rotor en corto circuito. El arranque es tan sencillo como el de los motores en jaula, basta cerrar el interruptor que le comunica con la red alimentadora.

Los constructores con el fin de evitar el uso de escobillas etc. han ideado motores que llevan el reóstato de arranque colocado en el mismo rotor y que se acciona desde fuera por medio de una palanca.

La fig. 205 representa lo mismo que la 204, con la sola diferencia de que en ella hemos conectado estator, rotor y reóstato en Y.

Otro método para disminuir el alto amperaje de arranque es el mostrado en la fig. 206, llamado de rotor en oposición.

En las ranuras del rotor se han colocado dos enrollamientos distintos con número de vueltas diferente. El enrollamiento principal tiene mayor número de vueltas que el enrollamiento secundario o auxiliar. Cuando se conecta el motor al circuito, se produce una inducción en el rotor, debilitándose la corriente en el enrollamiento principal por la corriente que se forma en el enrollamiento secundario. Las tensiones inducidas son contrarias y el motor en consecuencia arranca suavemente. Cuando el rotor alcanza su velocidad normal, se ponen en corto circuito los tres bornes A, B y C por medio de un dispositivo especial quedando el esquema como se ve en a fig. 206 b. Desde este momento, las tensiones en las fases principal y secundaria no se contrarían como lo muestran las flechas en la figura, salen ambas de una fase para entrar en las otras dos; y el rotor funciona en corto circuito.

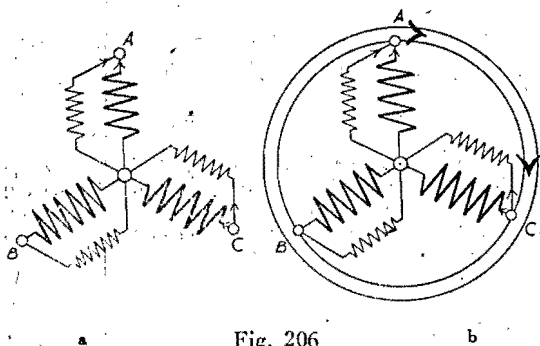


Fig. 206

Motores con inducido en corto circuito sin uno de los dispositivos especiales de arranque, e. d. motores con rotor de jaula sencilla, se construyen hasta potencias de cinco caballos. Sin embargo, en los tipos grandes aun de estos motores se hace una instalación que permite entregarle al estator al principio un amperaje menor que durante el trabajo normal; esta es el switch estrella triángulo. En el momento del arranque las tres fases del estator se conectan en estrella lo que equivale a entregar a la fase una tensión menor que la de la línea, y cuando ya el motor ha arrancado, se conectan las fases del estator en triángulo (voltaje de fase = voltaje de línea). Este switch se ve en la figura 207.

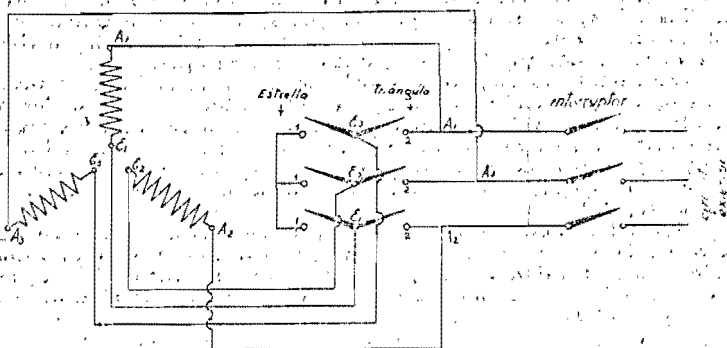


Fig. 207

No mostramos figura de la característica velocidad-intensidad del motor asincrónico; pues esta curva es muy semejante a la de un motor de corriente continua en derivación, e. d. disminuye la velocidad cuando aumenta la intensidad en el rotor, pero relativamente poco.

La regulación de la velocidad de estos motores puede hacerse de varias maneras, como se deduce de la fórmula para la velocidad:

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

De manera que podríamos hacer variar f , pero para esto es preciso hacer variar la velocidad del alternador que produce la corriente alimentadora, y esto es inaceptable en general (porque así variaría la velocidad de todos los motores conectados a la misma central).

También se han construido motores con número de polos variable. Desgraciadamente la construcción es algo complicada. El estator de estos motores consta de dos devanados distintos, cada uno con su nú-

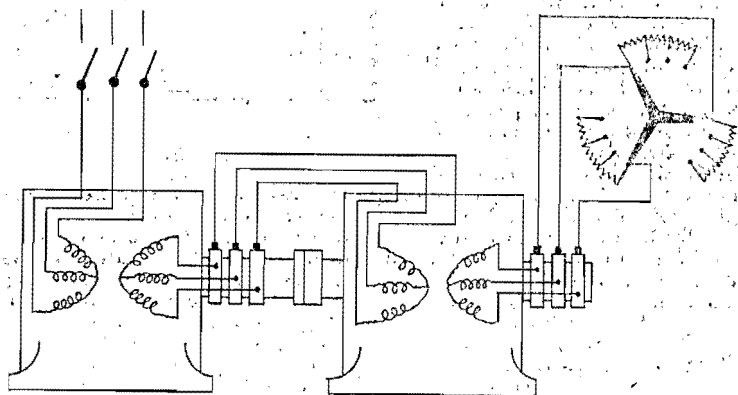


Fig. 208

mero de polos. Según pase la corriente por el uno o por el otro, se obtendrá una velocidad distinta. En cuanto a las velocidades intermedias sólo se pueden obtener a expensas de una resistencia intercalada en el rotor con el correspondiente despilfarro de corriente como sucede siempre en los reóstatos de arranque.

En instalaciones grandes y más importantes como en trenes, aparatos de laminación etc., se efectúa el cambio de velocidades valiéndose de dos motores trifásicos montados sobre el mismo eje cuyas conexiones entresí y con la línea pueden combinarse de diversos modos, permitiendo varias velocidades. Esta conexión se llama conexión en cascada y un ejemplo sencillo de una cascada lo muestra la fig 208.

La red alimenta el estator del primer motor. Con la corriente recogida del rotor de este motor alimentamos el segundo, montado sobre el mismo eje que el primero. El rotor del segundo está unido al reóstato de arranque. En este caso, la fórmula para la velocidad es:

$$n = \frac{60 f}{p_1 + p_2}$$

se ve que se obtiene la mitad de la velocidad de una máquina sola en el caso de que ambas máquinas tengan el mismo número de polos.

Otro método de conexión consiste en unir un estator a la red, el otro al reóstato de arranque y los dos rotores entre sí. Así se pueden suprimir los anillos y escobillas.

También podría emplearse cada motor separadamente, con lo cual obtendríamos 4 combinaciones distintas en el uso de la cascada.

La relación entre el par y sus causas no es tan sencilla como en el estudio de los motores de corriente continua; nos contentamos con dar una de las características más interesantes para el motor asincrónico, o sea la relación entre par y resbalamiento (véase fig 209). Se ve que para el arranque cuando el resbalamiento es igual a 100%, el par tiene un cierto valor, aumenta lentamente hasta un máximo, después cae rápidamente hasta hacerse 0 para el resbalamiento nulo o sea cuando la velocidad del rotor es igual a la velocidad del campo rotatorio.

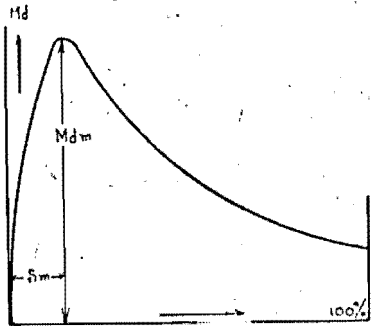


Fig. 209

En cuanto al desfaseamiento entre intensidad y voltaje en la línea alimentadora, podemos decir que es igual a 90° cuando el resbalamiento es 0. Esto ya lo podemos notar del hecho de no tener intensidad ni el rotor ni el estator en este caso ideal que como vimos en la parte teórica sólo se explica cuando el desfaseamiento es igual a 90°. Este desfaseamiento disminuye a medida que crece el resbalamiento sin alcanzar el valor 0. De esto se deduce que el factor de potencia es 0 o muy pequeño para la marcha en vacío o para cargas pequeñas comparadas con la carga máxima del motor. Tenemos pues como indicación práctica que un motor asincrónico, no debe emplearse con una carga menor de la normal para que está destinado. El cuadro número

10 del apéndice muestra el factor de potencia a la carga para la cual el motor está destinado y el factor de potencia a una carga menor y mayor.

Sucede con frecuencia que las centrales eléctricas exigen de los consumidores que el factor de potencia no baje de cierto límite. Muchos motores por esto van acompañados de un pequeño motor sincrónico que no tiene otro objeto que regular la fase.

La caja de bornes de los motores trifásicos asincrónicos tiene por lo general seis bornes correspondientes a los principios y los fines de las tres fases del estator, para que las instalaciones puedan hacerse de acuerdo con las necesidades del caso en el lugar de uso. Muchos constructores modernos denominan el principio de la primera fase con 1 y el fin con 1', el principio de la segunda con 2 etc., algunos denominan el principio de la primera con U, el de la segunda con V, y el de la tercera con W, el fin de la primera con X, de la segunda con Y el de la tercera con Z. El orden de estos 6 bornes es por lo general el siguiente:

3'	1'	2'	Z	X	Y
1	2	3	U	V	W

Comunicando entonces siempre dos bornes en sentido vertical por un puente de cobre y comunicando los tres puentes con los tres alambres de la línea alimentadora, tenemos conexión en triángulo. Para obtener conexión en estrella comunicamos los tres superiores o los tres inferiores por un puente horizontal y conectamos los tres bornes que quedan libres con los tres alambres de la línea.

En caso de que la caja de bornes esté dañada y los seis alambres salgan enredados, se busca primero por medio de un acumulador y un voltímetro las tres fases, e. d. se averigua cuales son los alambres de la primera, segunda y tercera fase. Para saber cuales son los principios y cuales los fines, se hace varias veces conexión en estrella, variando siempre los tres alambres que forman el nudo, conectando en cada ensaye la corriente alimentadora e intercalando en los tres conductores de la línea alimentadora tres amperímetros absolutamente iguales. La conexión está bien, cuando los tres amperímetros muestran el mismo valor. Por qué?

d). El motor asincrónico monofásico y bifásico

Para máquinas de pequeña potencia se usa también corriente monofásica para producir un campo giratorio. Esto podemos mostrarlo fácilmente interrumpiendo una de las líneas alimentadoras de un motor asincrónico trifásico cuando está en marcha: el motor sigue moviéndose pero es capaz de mover apenas un 66% de su carga anterior.

Los motores asincrónicos monofásicos no pueden arrancar solos porque una corriente monofásica crea un campo alternativo pero no un campo rotatorio. En cambio, si imprimimos por un medio cualquiera movimiento inicial al rotor, se desarrollará inmediatamente una corriente alterna polifásica en el estator. Al principio el campo alternativo del estator induce una corriente en el rotor. En seguida, las espiras del rotor puesto en movimiento cortan las líneas de fuerza del campo alternativo. Así se induce en el estator otra corriente alterna desfasada de la principal. La acción recíproca de estas dos corrientes produce un campo giratorio que mantiene el motor en movimiento. Por supuesto, este campo giratorio es menos perfecto que el de la corriente trifásica.

Aunque estas máquinas son muy cómodas en su uso, la dificultad de ellas está en el modo de arrancar. Lo más sencillo sería a-

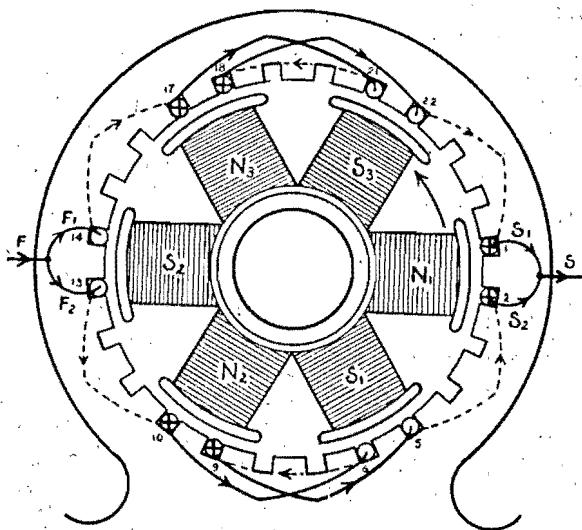


Fig. 210.—Esquema de un alternador con imanes rotatorios

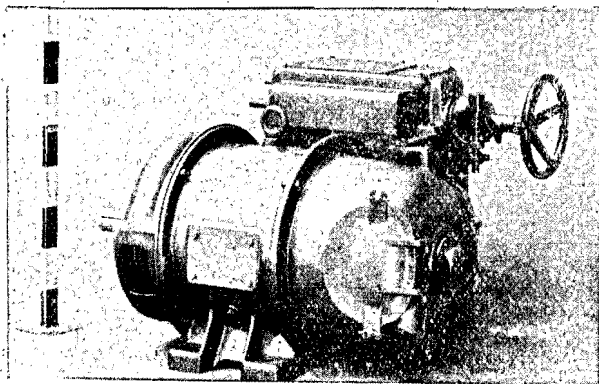


Fig. 211.—Motor asincrónico trifásico con escobillas y reóstato de arranque

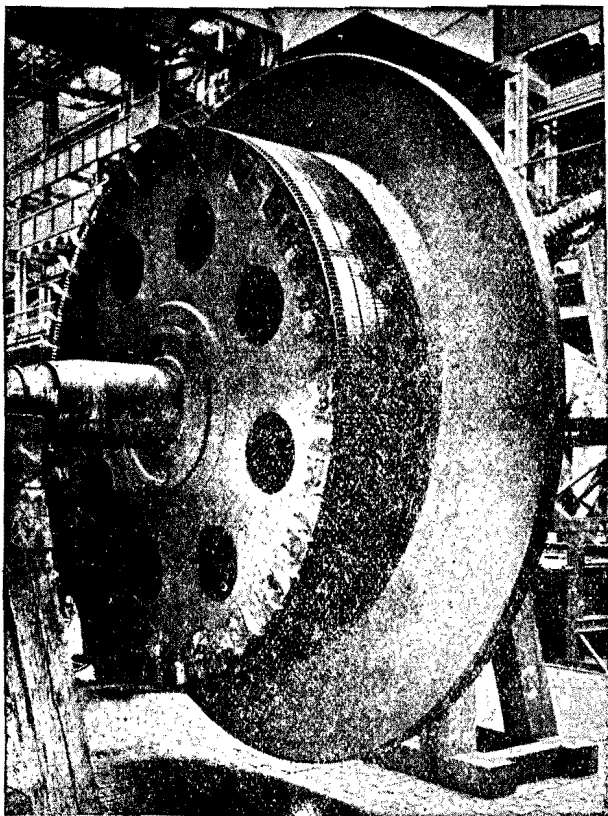
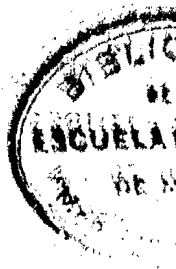


Fig. 212. Rotor y volante en una pieza.



rancarlas con fuerza mecánica auxiliar, pero como esto no es posible en la mayoría de los casos, el método usado con más frecuencia consiste en crear un campo giratorio valiéndose de un devanado especial llamado fase auxiliar y colocado en el estator con el devanado principal. En este devanado auxiliar se hace pasar parte de la corriente alimentadora desfasada artificialmente lo más posible, quedando así en el arranque el motor como motor bifásico. Después se sostiene la marcha del motor con la sola fase principal quitando con un switch especial la fase auxiliar. La fig. 213 muestra la fase principal (I) y la fase auxiliar (II) de tal instalación.

Por supuesto, puede producirse también la fase auxiliar, e. d. hacer del motor monofásico un motor bifásico, por medio de un condensador, que en este caso adelanta la fase auxiliar. Véase fig. 214. Sucede que por su disposición el par de arranque de estos motores no es alto y por esto su uso no es recomendable tratándose de vehículos, grúas etc. que necesitan un esfuerzo grande para arrancar.

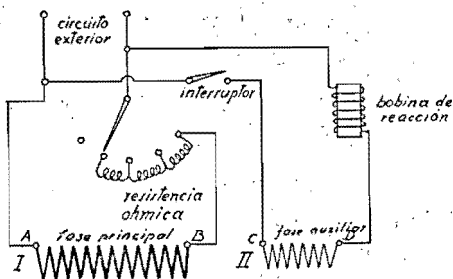


Fig. 213

e) El motor asincrónico como generador

Vimos en el estudio de los motores asincrónicos, que cuando la velocidad de éste era menor que la de sincronismo, absorbían una cierta intensidad y que cuando su velocidad aumentaba hasta hacerse

igual a la del campo rotatorio, la intensidad disminuía hasta hacerse nula. Si ahora por medio de una fuerza exterior, p. e. salto de agua, aumentamos esta velocidad, el motor se convierte en generador y da una cierta intensidad al circuito alimentador. Estos generadores asincrónicos son sencillos, no necesitan excitación por corriente continua y pueden utilizarse en pequeñas plantas que por supuesto deben poseer por lo menos un generador sincrónico. El generador asincrónico tiene muy poco uso.

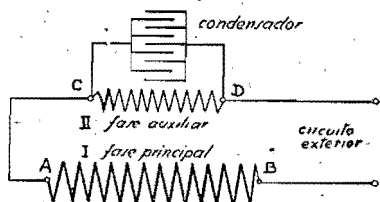


Fig. 214

d). El motor de colector

Esta palabra, aunque usada en la técnica, no coincide bien con las definiciones dadas en este libro. Para nosotros sería mejor llamar esta máquina motor de conmutador porque tiene un verdadero conmutador con delgas como las máquinas de corriente continua.

En efecto, entregando a un motor de corriente continua, bien sea en serie o en derivación, corriente alterna, el motor trabaja como con

corriente continua, pues la polaridad de los inductores cambia al mismo tiempo que el sentido de la corriente entregada al inducido.

Un tipo especial de estos motores es el llamado motor de repulsión, también con conmutador. En la fig 215, se ven dos polos rodeados por los conductores de la corriente alterna. Las dos delgas A y B están en contacto con dos escobillas que hemos conectado en corto

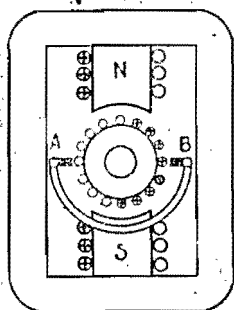


Fig. 215

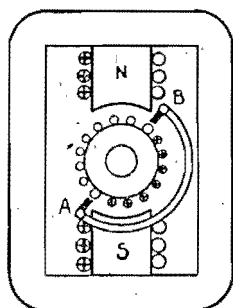


Fig. 216

circuito. Supongamos que en cierto momento el polo superior sea norte y el inferior sur. Entonces se generan en los conductores del rotor corrientes de inducción en sentido contrario. En todos los conductores de la izquierda (en el dibujo blancos) sale la corriente del papel; en todos los conductores de la derecha entra la corriente en el papel. El sistema del rotor con las escobillas equivale a un conductor circular cerrado, cuyo plano es normal al flujo magnético, que va desde el polo norte hacia el polo sur. Este círculo conductor no puede girar, se encuentra dinámicamente en equilibrio y éste es completamente independiente de las variaciones del magnetismo de los polos.

Totalmente distinto es el comportamiento, cuando se desplaza el eje de las dos escobillas, conectadas en corto circuito, como lo muestra la fig. 216. Ahora puede decirse que el rotor equivale a una vuelta cerrada de alambre (de la cual la unión entre las escobillas forma una parte), cuyo plano forma un ángulo con el flujo magnético. La corriente en esta vuelta se engendra por inducción. La vuelta tiende a girar, para colocarse en la misma posición de equilibrio que supusimos en el experimento anterior (fig. 215). Pero sucede que cuando gira el rotor y quedan—desde luego—las escobillas siempre en su misma posición se vuelve a crear de nuevo en las vueltas una corriente que tiende a hacerlas girar: como consecuencia el rotor gira continuamente.

El par de giro permanecerá constante puesto que cada vez que cambia la corriente alterna suministrada cambiará también el sentido de la corriente que recorre las espiras del inducido. Según lo anterior el inducido girará con un impulso que depende del desplazamiento de las escobillas a partir de la zona neutra. De este desplazamiento depende la intensidad que pasa de A a B.

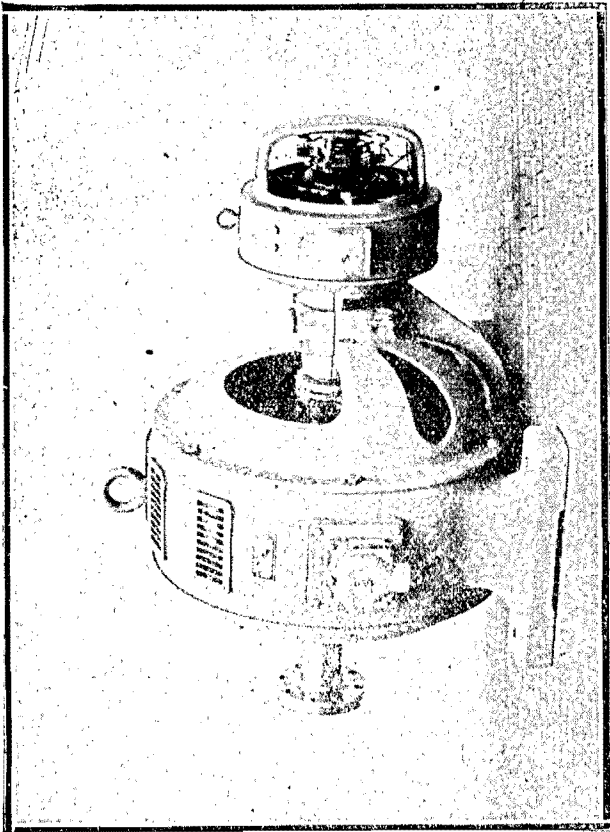


Fig. 217 Alternador trifásico

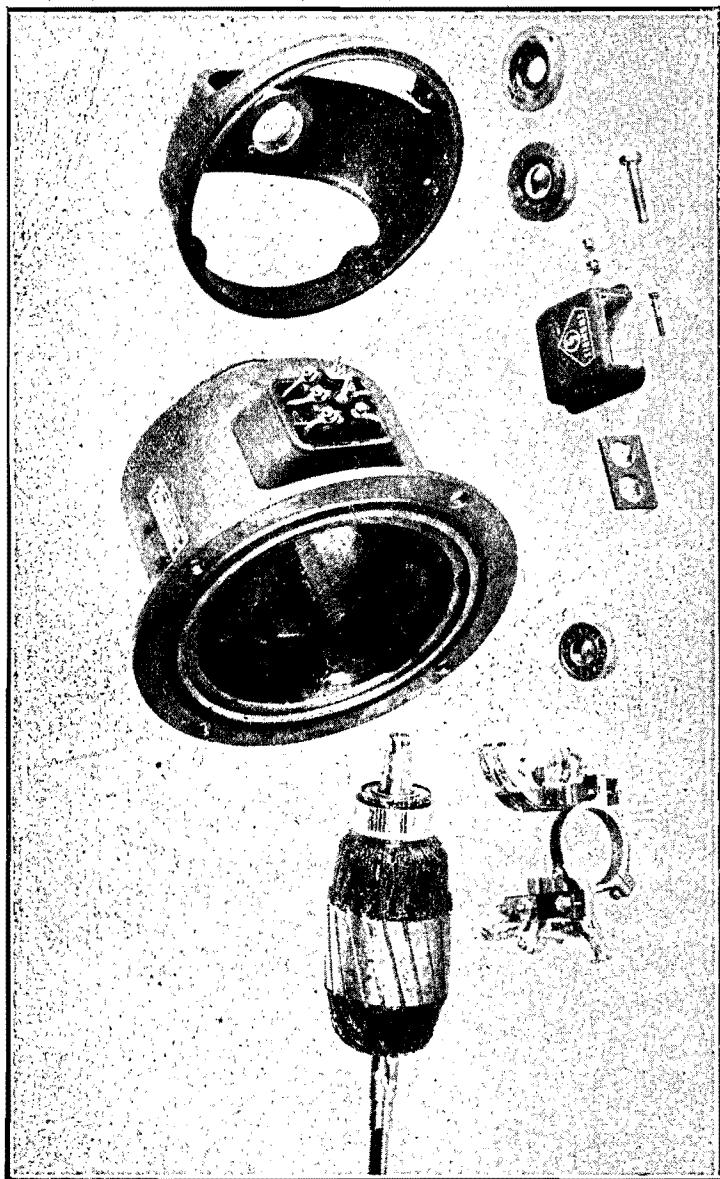


Fig. 218 Las diversas partes de un motor de corriente continua