

BIBLIOTECA DEL ELECTRICISTA PRÁCTICO

ALTERNADORES



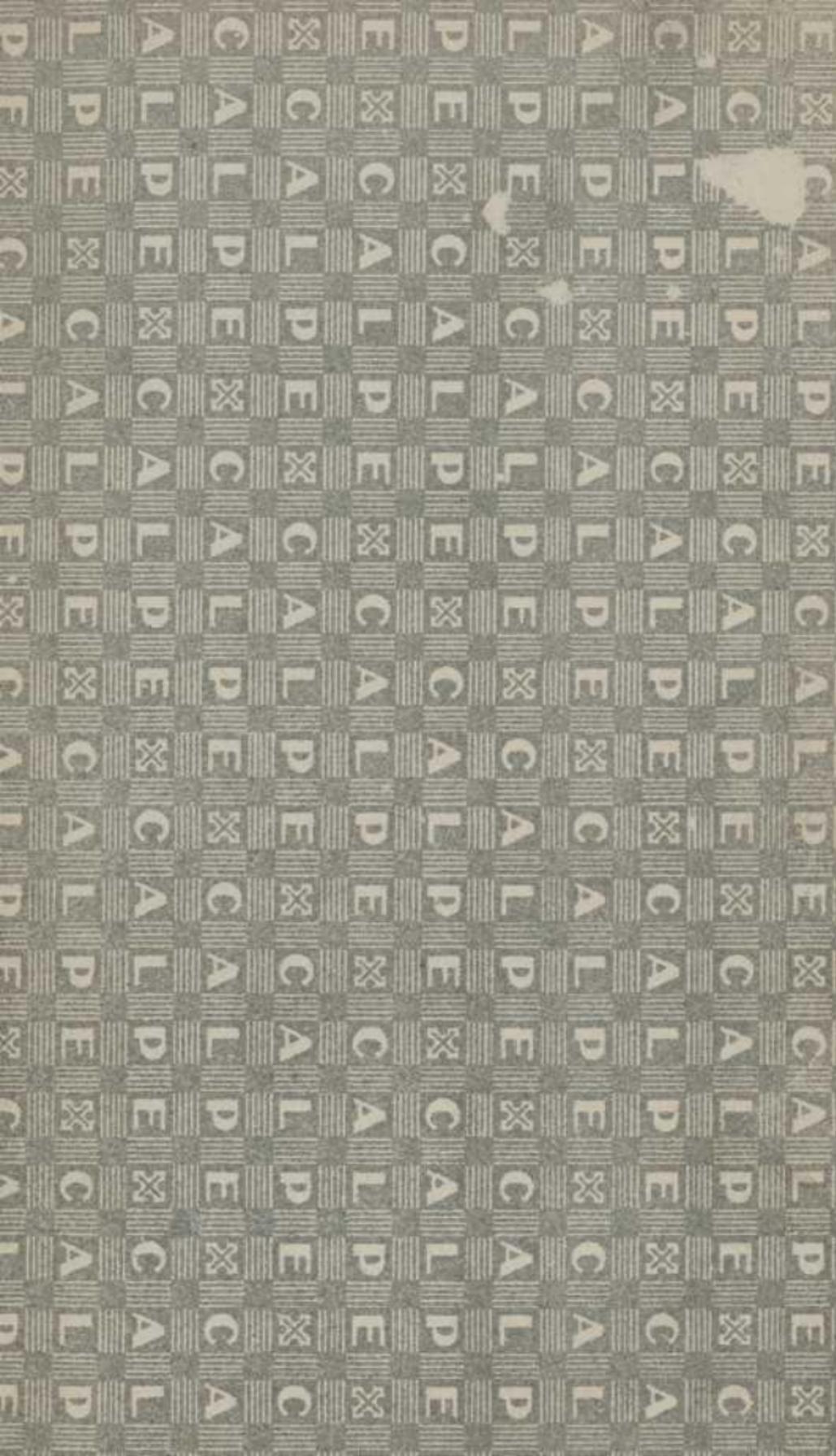
EDITOR

6

BARCELONA

2
01

S.G-11
7-48



81



ALTERNADORES

B.P. de Soria



61112048
D-2 1001

-2
001



R.º 3156

$\frac{6}{13}$

BIBLIOTECA DEL ELECTRICISTA PRÁCTICO

SERIE PRIMERA (Volúmenes 1 a 30)

PUBLICADA BAJO LA DIRECCIÓN

DE

D. RICARDO CARO Y ANCHÍA

LICENCIADO EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS, OFICIAL DE TELÉGRAFOS
Y PROFESOR DE ELECTROTECNIA Y TELEGRAFÍA EN LA
ESCUELA INDUSTRIAL DE TARRASA

TOMO VI

ALTERNADORES

— POR —

D. FRANCISCO ALSINA Y ALSINA

PERITO ELECTRICISTA

PROFESOR DE ELECTRICIDAD, MAGNETISMO Y ELECTROTECNIA
EN LA ESCUELA INDUSTRIAL DE LINARES

SEGUNDA EDICIÓN



« CALPE »

Compañía Anónima de Librería, Publicaciones y Ediciones

MADRID-BARCELONA

ES PROPIEDAD
Derechos de traducción
reservados

INTRODUCCIÓN

Fundamento y clasificación de los alternadores.— Se conoce con el nombre de *Dinamo de alterna* o simplemente *Alternador* todo generador eléctrico de corriente alterna.

La corriente eléctrica de forma continua puede obtenerse por medio de Pilas (tomo III) bien sean generadores *quimicoeléctricos* o *termoeléctricos*; y también, aprovechando los fenómenos de inducción (tomo I, capítulo IX), mediante los generadores *mecanicoeléctricos* estudiados en el tomo IV.

La corriente eléctrica de forma senoidal solamente puede ser producida por inducción; así es, que todo alternador es un transformador de energía *mecanicoeléctrico*, fundado en la inducción de un campo magnético sobre un circuito eléctrico, figura 1.

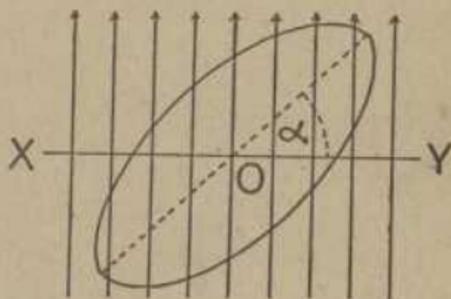


Fig. 1

En el tomo II, capítulo II, se estudió la manera de producir una corriente inducida en la espira O, lo que conseguimos *variando el ángulo α que forma el plano de la espira con las líneas del campo mag-*

nético; es decir, moviendo la espira en el seno de un campo o éste en el seno de la espira. Según esto, un alternador puede ser de campo fijo y circuito movable o de campo movable y circuito fijo.

Como en las dinamos de corriente continua, llamaremos *inductor* al conjunto de órganos que producen el campo magnético, y entenderemos por *inducido* la parte en que se desarrollan las corrientes inducidas. Por lo dicho anteriormente, se comprende que inducido e inductor pueden ser indistintamente uno movable y otro fijo. Como es natural, su forma y construcción no serán las mismas en uno y otro caso.

Debemos, pues, clasificar los alternadores en dos grupos:

Alternadores de inducido movable.

Alternadores de inductor movable.

A esos dos tipos de alternador, de grande importancia industrial, vamos a dedicarles la mayor parte del tomo, y sólo como complemento, estudiaremos después un tipo de alternador de inducido e inductor fijos.

Clasificación de los inducidos. — Recordemos (capítulo II, tomo II) que el ángulo de fase de una tensión en un momento cualquiera, es el ángulo α que la espira inducida forma con la dirección del campo inductor.

Cuando se tienen varias espiras influídas por un mismo campo, las fuerzas electromotrices en ellas inducidas concuerdan en fase, si forman todas el mismo ángulo α , y resultan discordantes en caso

contrario. Como es natural, para que se sumen las fuerzas electromotrices de las espiras deben ser concordantes.

Si las corrientes de todas las espiras de un inducido son concordantes, forman éstas una sola fase y el inducido es *monofásico*. Cuando las corrientes inducidas son discordantes, siempre es posible formar grupos de espiras concordantes, que dividen el conjunto en varias fases formando un inducido *polifásico*; el cual se denomina bifásico, trifásico, tetrafásico... según sean 2, 3, 4... el número de fases resultantes.

Según esto, los inducidos de alternador en general deben clasificarse en

Inducidos monofásicos, e

Inducidos polifásicos.

* * *

Como introducción al estudio de los alternadores vamos a recopilar las fórmulas generales, deducidas al estudiar, en el tomo II, las corrientes alternas y al propio tiempo las prepararemos para que resulten de práctica aplicación en los alternadores.

Período, frecuencia y polos. — En el tomo II, capítulo II, queda definido el período como *el tiempo que tarda la fuerza electromotriz en tener dos veces el mismo valor y signo*. Partiendo del momento en que la espira pasa por el centro de un polo, el tiempo equivalente a un período será el

empleado en alcanzar el centro de otro polo de igual signo.

En máquinas bipolares el período es una vuelta completa, ya que en ellas se tiene un solo polo de cada signo. En las máquinas multipolares de $2p$ polos, alternativamente situados, el tiempo correspondiente a un período es $1 : p$ de vuelta, y *cada vuelta equivale a p períodos*.

En el mismo capítulo, se define la frecuencia como *el número de períodos por segundo*; luego si el rotor de un alternador está animado de n revoluciones por minuto o $n : 60$ cada segundo, la frecuencia de la corriente inducida será:

$$f = p n : 60 \quad \text{ó} \quad 60 f = p n \quad [1]$$

Esta relación, entre la frecuencia, las revoluciones y el número p de pares de polos, se puede escribir así:

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

En la que haciendo $f = 50$, que es la frecuencia generalmente empleada, y dando a n los valores 3000, 1500, 1000, 750, 600, 500, 375, 300, 250, 200, 150, 125, 120 y 100; resultan 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 24, 25 y 30 pares de polos respectivamente.

Pulsación. — Si igualamos la expresión de la frecuencia establecida en el tomo II, página 25

$$f = a : 2 \pi$$

con la que hemos deducido, fórmula [1]

$$\frac{a}{2 \pi} = \frac{\phi n}{60}$$

tendremos el valor de la pulsación a dependiente de polos y revoluciones

$$a = \frac{2 \pi}{60} \phi n = 0'1047 \phi n \quad [2]$$

Fuerza electromotriz, corriente y potencia. — El valor máximo de la fuerza electromotriz inducida en una espira vale (tomo II, pág. 22)

$$E_0 = a \mathcal{N}$$

Cuando se tengan m espiras unidas en serie, la máxima fuerza electromotriz, teniendo en cuenta el valor de a dado por la fórmula [2], será:

$$E_0 = 0'1047 \phi n m \mathcal{N}$$

a la que corresponde una fuerza electromotriz eficaz (tomo II, pág. 35)

$$E = 0'7071 E_0 = 0'074 \phi n m \mathcal{N}$$

que en voltios (tomo II, pág. 159) será:

$$E = 0'074 \phi n m \mathcal{N} 10^{-8} \quad [3]$$

Si el alternador y receptores forman un circuito de impedancia Z , la fuerza electromotriz dará una corriente (pág. 36 del tomo II)

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{ac} + a\mathcal{L}\right)^2}} \quad [4]$$

y una potencia por fase

$$W = E I \cos \varphi \quad [5]$$

Componentes de la intensidad. — Siempre que la corriente $I = OB$ esté desfasada de la tensión $E = OA$, el factor de potencia $\cos \varphi$ será menor que la unidad

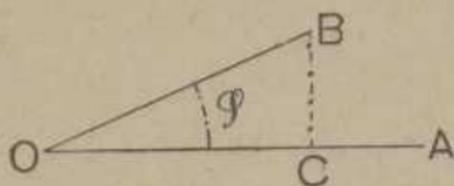


Fig. 2

y la corriente se podrá descomponer en dos intensidades perpendiculares (fig. 2), una con vatios

$$OC = I \cos \varphi \quad [6]$$

en fase con la tensión, y otra normal a ésta

$$CB = I \operatorname{sen} \varphi \quad [7]$$

sin vatios, y que produce un flujo contrario al inductor, llamado *flujo de reacción* o *desimantante*.

Tensiones y caídas. — Todo circuito eléctrico, consta de dos partes muy distintas, que son:

La parte inducida, o *circuito interior*, y la parte de aprovechamiento, o *circuito exterior*.

La primera la forma el inducido del generador, y en ella se produce la fuerza electromotriz de inducción, siempre que el generador marche con el campo inductor excitado.

El circuito exterior lo forman la red de distribución, con los aparatos de medición y de maniobra y los receptores.

Cuando todas las partes del circuito eléctrico están conectadas formando circuito cerrado, la fuerza electromotriz mantiene una diferencia de potencial en los bornes del generador, la cual venciendo la impedancia del circuito exterior determina en él una corriente eléctrica.

La fuerza electromotriz es, pues, la causa de la corriente y toda ella se consume en vencer la impedancia del circuito interior, más la del circuito exterior. La parte de fuerza electromotriz gastada por la impedancia interior, es la llamada *caída interior de tensión*, que, como es natural, no la aprovecha el circuito exterior. Lo que queda de la fuerza electromotriz, descontada la caída interior, es la *diferencia de tensión* disponible en los bornes del generador y que aprovecha el circuito exterior.

La potencia dada por la fórmula [5] es la total producida en la fase del alternador; pero la potencia utilizable en el circuito exterior es siempre algo menor, toda vez que los voltios disponibles

en ese circuito, no son los totales E . Para calcular la *potencia útil* basta transformar la fórmula [5] en

$$W = v i \cos \varphi \quad [8]$$

Rendimiento. — La diferencia entre las potencias correspondientes a las fórmulas [5] y [8], es la pérdida eléctrica del alternador, pérdida que es consumida por las resistencias de inductor, inducido y colectores.

Todo generador eléctrico, además de la pérdida eléctrica, tiene sus pérdidas mecánicas, producidas por el rozamiento de los soportes, escobillas y aire. El motor que acciona el generador debe suministrarle una potencia que sea igual a la dada por la fórmula [5] aumentada con las pérdidas mecánicas; siendo esta suma lo que se llama potencia total del motor, mientras la potencia total del generador es la que se utiliza en el circuito exterior.

La relación entre la potencia total utilizable del generador y la total del motor es el rendimiento del generador en su transformación de energía

CAPÍTULO PRIMERO

ALTERNADORES DE INDUCIDO MOVIBLE

Secciones inducidas. — Para que la fuerza electromotriz inducida de un alternador sea grande, la fórmula [3]

$$E = 0.074 p n m \mathcal{N} 10^{-8}$$

nos dice que es conveniente el empleo de muchas espiras m y un flujo \mathcal{N} grande.

Así como la máquina teórica simple (fig. 1) tiene una sola espira moviéndose en el campo inductor, una máquina industrial debe tener un número de espiras m , tanto mayor cuanto más grande sea la tensión deseada; las cuales se arrollan muy juntas y en planos paralelos para que el ángulo α sea común a todas ellas y resulten concordantes sus tensiones. El conjunto de espiras que forman un mismo paquete o carrete multiplicador, es lo que se llama una *sección inducida*.

Las secciones inducidas, en inducido movible, deben estar unidas a un eje de giro, y para asegurar su posición y formar un conjunto bastante

rígido, suelen arrollarse (fig. 3) sobre núcleo de hierro, que unido al eje del rotor r les sirve de vehículo en su movimiento.

Siendo el inductor de la figura 3, bipolar, tiene un solo campo, como el de la figura 1, y al multiplicar por m la espira inducida, deben arrollarse todas sobre el mismo eje para que queden en planos paralelos.

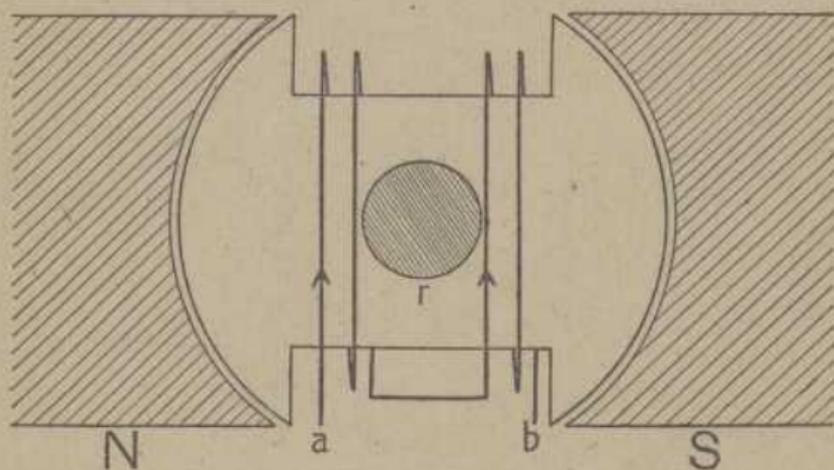


Fig. 3

Las m espiras inducidas se han repartido en dos secciones a y b alojadas a cada lado del eje con el fin de tener equilibrado el rotor. Con esta disposición resulta *el inducido de tantas secciones como polos* y el devanado se denomina de *secciones cortas*.

Observando las secciones desde la cara de los polos respectivos, resulta *el sentido de arrollamiento contrario de una sección a otra*. En efecto, mirando desde el polo N el sentido de la flecha en a se ve de derecha a izquierda, mientras el sentido de la b , observado desde S , resulta de izquierda a derecha.

Recopilando las dos observaciones de los párrafos precedentes, podemos sentar la siguiente regla práctica, general para inducidos de cualquier número de polos:

El número de secciones inducidas es igual al de polos y se arrollan consecutivamente en sentido contrario.

De esta regla, se deduce la siguiente consecuencia para los alternadores multipolares:

Cuando las secciones inducidas se reducen a la mitad, para lo cual bastaría colocar todas las espiras de la figura 3 a un lado del eje de giro, el sentido de arrollamiento es único y el número de secciones igual a la mitad del de polos, resultando el llamado devanado de secciones largas.

Armadura. — Los núcleos que sirven de vehículo a las secciones inducidas, que forman la *armadura* del inducido, sirven al mismo tiempo de camino al flujo inductor, y siendo la permeabilidad magnética del hierro mucho mayor que la del aire (tomo I, capítulo III), favorecen el paso de las líneas de fuerza, aumentan el flujo y dan mayor fuerza electromotriz (fórmula [3]).

Por la misma razón, conviene reducir la zona de aire que separa la parte fija, *estátor*, de la movible, *rótor*, al límite preciso para tener movimiento sin rozadura. Esa zona de aire es el llamado *entrehierro* de la máquina, y es la única parte del circuito magnético que no tiene hierro.

Moviéndose la armadura en el campo magnético, se desarrollan en su seno corrientes de Foucault

(tomo I, cap. IX) que consumen buena parte de la energía, transformándola inútilmente en calor perjudicial.

Se disminuye el efecto de las corrientes de Foucault construyendo la armadura con planchas de palastro, empiladas al eje y aisladas entre sí (tomo II, pág. 71), en lugar de formarlas de un todo macizo; de ese modo se corta el camino de las corrientes de Foucault y se dificulta su desarrollo.

La construcción de la armadura y las maneras de fijarla al árbol, son en un todo análogas a la de los inducidos de corriente continua descritos en el capítulo II del tomo IV.

Ranuras. — En la figura 3, las ramas de dos secciones contiguas están alojadas en un mismo canal

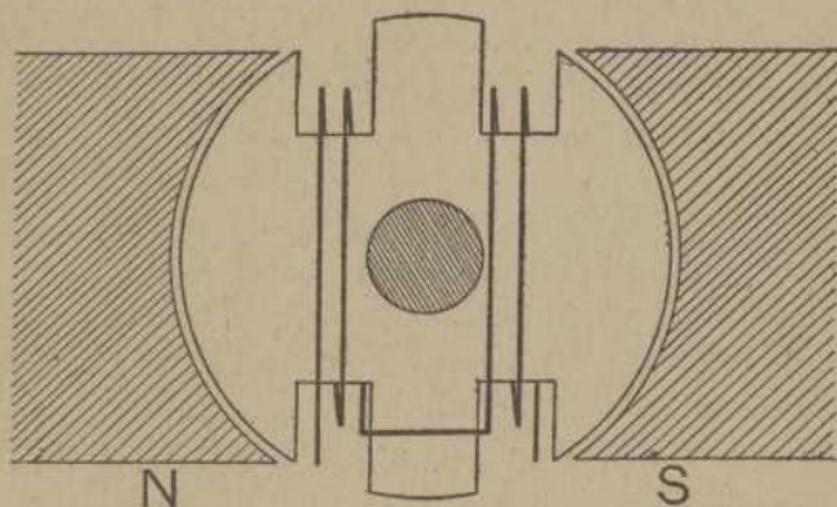


Fig. 4

o *ranura*; pero también podría disponerse la armadura, como en la figura 4, para que cada rama

tuviese su ranura propia. En la primera construcción hacen falta *tantas ranuras como secciones*, mientras con la segunda se necesitan *doble número de ranuras que secciones*.

Cuando a un inducido multipolar se le da una ranura por sección, suelen colocarse las secciones de manera que dentro de una misma ranura venga una rama al fondo y otra a la periferia, haciendo que cada sección tenga una rama montada sobre la de otra sección (fig. 5). Esa manera de

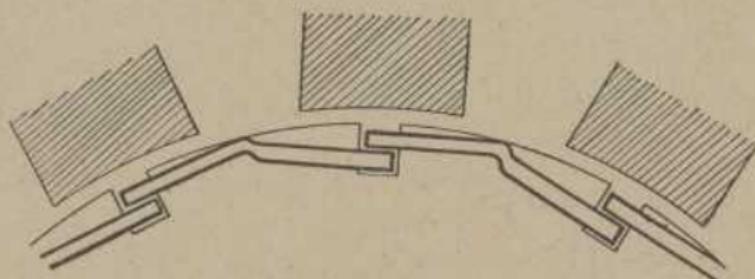


Fig. 5

colocar las secciones es lo que se llama un *devanado en dos capas*, y con él se consigue mejor igualdad entre los ángulos de fase de todas las secciones.

El devanado en dos capas es posible solamente en inducidos de tantas secciones como polos, puesto que sólo en tal caso las ramas contiguas de dos secciones vecinas son recorridas por corrientes del mismo sentido (fig. 3).

Hasta aquí hemos *concentrado* todas las espiras de una sección en un solo haz o madeja. Cuando la sección inducida tiene muchas espiras y éstas son de hilo grueso, la ranura capaz de contener el

haz único resultaría muy grande, y éste de difícil sujeción; en tal caso se reducen las dimensiones de las ranuras *diseminando* las espiras totales entre u madejas, que se alojan en $2u$ ranuras. En la figura 6, se han dividido las secciones a y b , en dos madejas ($u = 2$), correspondiendo a cada sección $2u = 4$ ranuras.

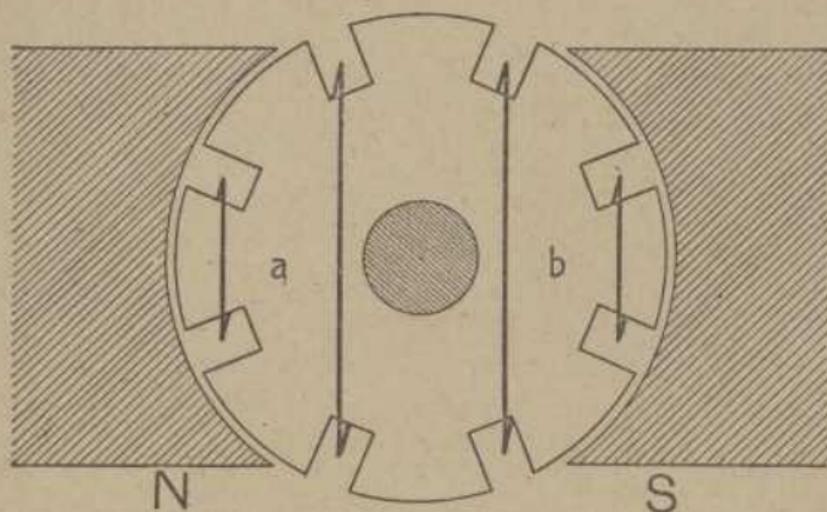


Fig. 6

A las paredes de las ranuras se les da dirección radial, a fin de facilitar la entrada de las madejas.

Si las secciones inducidas tienen una sola madeja, el inducido se llama de *secciones concentradas*, y cada una necesita *dos ranuras*. Las secciones de varias madejas forman un inducido de *secciones diseminadas*, y requieren $2u$ ranuras.

Los primeros, tienen un número de ranuras

$$2 \times 2 p \quad \text{ó} \quad 2 p$$

según tengan tantas secciones como polos o solamente la mitad.

Los inducidos de secciones diseminadas, necesitan un número de ranuras u veces mayor que los de secciones concentradas, luego deben tener

$$2 \times 2 p u \quad \text{ó} \quad 2 p u \text{ ranuras} \quad [9]$$

Claro está, que en uno y otro tipo, los inducidos de tantas secciones como polos, se reduce el número de ranuras a la mitad devanándolos en dos capas.

Colector. — El conjunto de las secciones inducidas, conectadas en serie, deben formar un arrollamiento abierto para poderlo unir a la red de distribución que, al cerrar puente sobre los receptores, completa el circuito y lleva la corriente inducida a los aparatos que han de utilizarla.

La unión del circuito interior con el exterior, siendo uno movable y otro fijo, debe efectuarse mediante órganos especiales llamados *colectores*, formados por los terminales de uno y otro circuito.

Siendo el circuito inducido movable, movibles deben ser sus terminales, mientras que los del circuito exterior deben ser, como él, fijos. La unión constante entre los terminales de ambos circuitos se consigue uniendo los bornes del circuito exterior $b b'$, (fig. 7) a unas escobillas $e e'$, que con presión se apoyan a los anillos $a a'$ terminales del inducido.

Los anillos colectores, montados en el mismo árbol del rotor, giran con el inducido y unidos a los

extremos de éste, lo mantienen en comunicación constante con el circuito exterior a través de las escobillas, que ni un momento dejan de rozar los anillos.

En alternadores pequeños y de baja tensión, se simplifican los órganos del colector soldando un extremo del arrollamiento inducido a la masa del rotor, que en buena comunicación con la peana

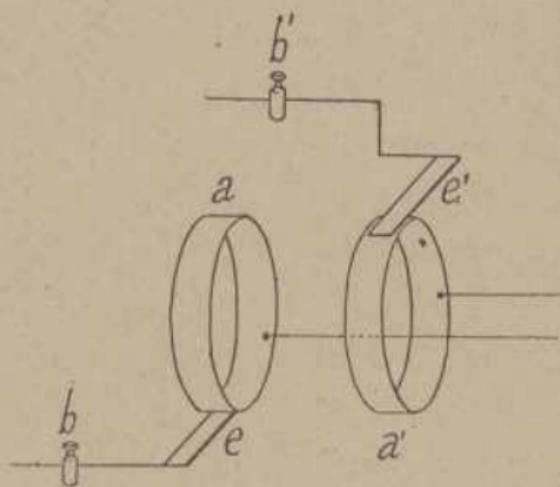


Fig. 7

por los cojinetes de la máquina puede ser unido a un conductor de la red sin intermedio de escobilla. Con esta modificación, el colector se reduce a un solo anillo y una escobilla.

El colector de un inducido movable constituye el punto flaco del circuito, pues las trepidaciones de la máquina y las rugosidades que con el uso se forman en la superficie frotada, hacen inseguro el contacto de las escobillas y anillos. Un contacto imperfecto ha de originar grandes chispas de in-

terrupción que pueden quemar el colector, además de alterar la marcha de los receptores, principalmente en circuitos de alta tensión.

Por todo eso, el empleo de colector e inducido móvil sólo puede aceptarse en generadores de baja tensión.

Devanado de dínamo. — El inducido de alternador en vez de formarlo con secciones separadas, como hasta aquí hemos hecho, puede tener un arrollamiento igual al de inducido de dínamo, de los llamados *serie simple* (tomo IX, capítulo IV).

En efecto, el devanado serie simple, es un arrollamiento cerrado y único que las escobillas dividen y reúnen en dos circuitos paralelos; en él, las escobillas separadas un paso polar o alternancia y apoyadas sobre colector enderezador de corrientes, de tantas derivaciones como delgas (cap. V, tomo IV), reciben una corriente continua, pero si al arrollamiento se le da solamente dos derivaciones, separadas un paso polar o alternancia, y se unen a un colector de anillos, como el de la figura 7, las dos escobillas recogerán la corriente, tal como se induce, alternativamente de signo contrario.

La máquina así construída será un alternador y diferirá de la dínamo solamente en el colector, que es, a la vez, conmutador y colector en la dínamo y sólo colector en los alternadores.

Tipos de armaduras. — Hemos dicho que las secciones inducidas se alojan arrolladas sobre nú-

cleo de hierro llamado *armadura*, que sirve de vehículo a las secciones inducidas, en los alternadores de inducido móvil, y al propio tiempo de camino permeable al flujo inductor. Asimismo hemos indicado que a fin de disminuir las pérdidas de Foucault, el cuerpo de la armadura se forma empilando planchas de palastro, cortadas con igual matriz y aisladas por una de sus caras, hasta formar con ellas una corona cilíndrica de largo axil y espesor radial suficientes.

El camino que la armadura ofrece al paso del flujo, es el de un rectángulo formado por su largo axil y espesor radial; entendiéndose por tales, el largo de la armadura paralelo al eje y su espesor tomado sobre un radio.

La forma de la armadura y la manera de arrollar en ella las secciones inducidas, varía según los tres tipos siguientes:

Tambor, Anillo y Disco.

Inducido de tambor. — Cuando la corona del inducido tiene más largo axil que espesor radial, la armadura toma la forma de un tambor y las secciones inducidas se alojan sobre la superficie cilíndrica externa (fig. 8) que, en los inducidos móviles, es la superficie activa como contigua a los polos inductores.

La armadura en forma de tambor tiene, en general, la superficie activa ranurada para alojar en sus ranuras las ramas de las secciones inducidas, devanadas en una o dos capas, tal como hemos detallado (figuras 4, 5 y 6).

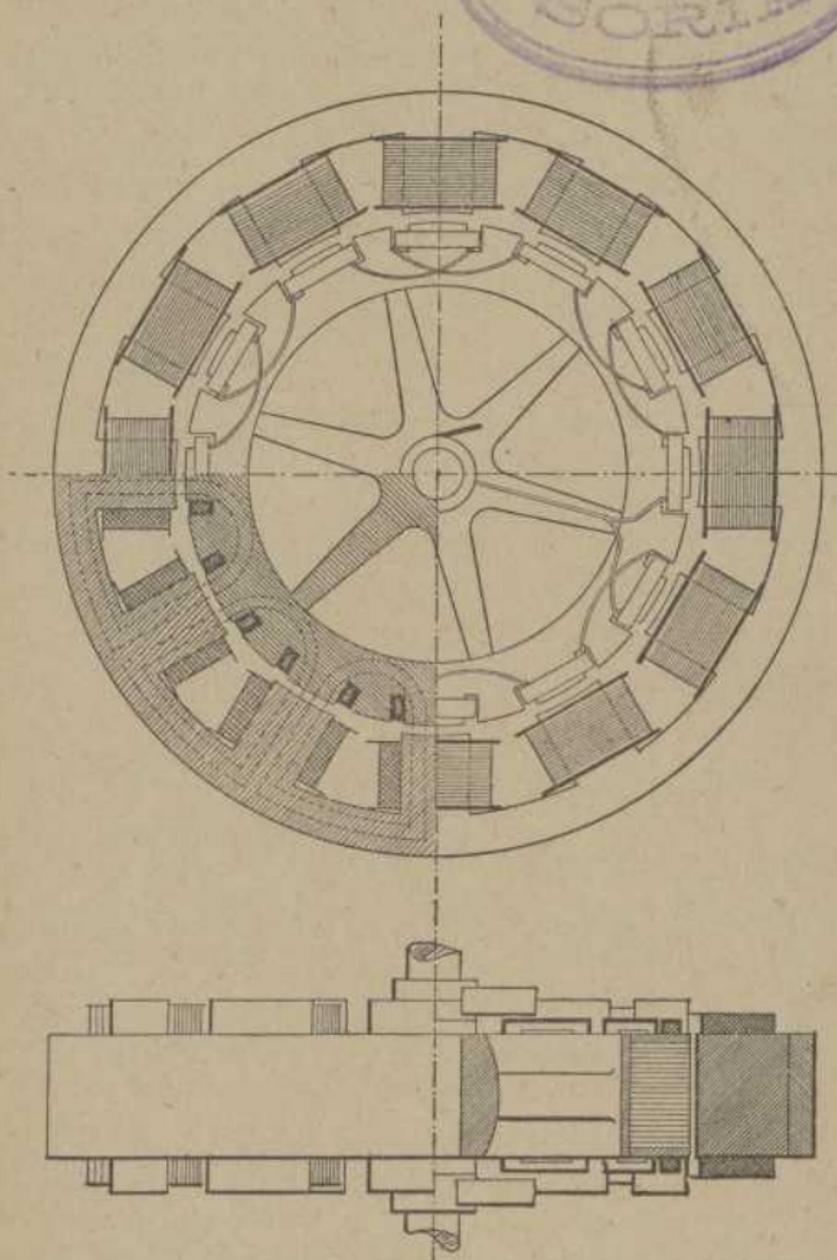


Fig. 8. — Alternador multipolar con inducido de tambor, visto de frente y de perfil

La figura 5, representa un inducido de tambor devanado en dos capas y con tantas secciones como polos; en el esquema de la figura 8, hemos representado un tambor de tantas secciones como polos y devanado en una sola capa.

El alternador esquemáticamente representado, en vista de frente y de perfil, por la figura 8, tiene el inductor de doce polos producidos por doce electroimanes provistos de carretes consecutivamente arrollados en sentido contrario y unidos en serie para que den polos consecutivos de signos contrarios, al ser alimentados por la misma corriente inductora. Los núcleos de esos electroimanes se reúnen a una culata circular de fundición. La vista de frente, en su cuadrante inferior cortado, muestra por medio de línea de trazos el camino del flujo en cada circuito magnético. El corte de la corona del inducido, en la vista de perfil, muestra las planchas de palastro que entran en su construcción; y en la misma vista se ven los dos anillos del colector, que forman los terminales del inducido y sobre los cuales se apoyan las escobillas unidas al circuito exterior o de consumo.

En los inducidos de tambor, las secciones inducidas colocadas en las ranuras de la superficie externa del tambor, se aprisionan al mismo por medio de cinchos o de cuñas, como en los inducidos de dínamo.

El inducido tambor presenta una gran sección a la entrada del flujo; la que puede ser aumentada, todo lo que convenga al flujo inductor, dando mayor largo axil a la armadura. Está, pues, indicado

para máquinas de mucho flujo, o sea, de gran tensión (fórmula [3]).

Tiene el inconveniente de la sujeción imperfecta de las secciones inducidas, que debe asegurarse mucho en las máquinas de gran velocidad periférica.

Inducido de anillo. — Cuando la armadura tiene aproximadamente el mismo largo axial que espesor radial, constituye un anillo de sección casi cuadrada, que sirve de núcleo circular a las secciones inducidas, que se arrollan en hélice sobre él (figura 9).

Esta forma de arrollar las espiras, asegura la sujeción de las mismas sobre la armadura, sin necesidad de cinchos ni cuñas y con exclusión de todo peligro de desprendimiento por fuerza centrífuga. Desde este punto de vista el inducido móvil de anillo tiene ventaja sobre el tipo de tambor; pero sólo puede adoptarse para alternadores de poco flujo, toda vez que el camino ofrecido a las líneas de fuerza por el anillo presenta poca sección, si no se da a la corona un largo axial grande. Esto último no es recomendable porque la armadura tomaría la forma de tambor y, arrollando las espiras en hélice, resultaría un gasto grande de cobre en el inducido.

Un inducido de anillo debe tener tantas secciones inducidas como polos, por lo tanto deben arrollarse consecutivamente en sentido contrario (figura 9). El devanado de tantas secciones como pares de polos no es recomendable en inducidos de anillo, puesto que estando todas las secciones arrolladas en el mismo sentido, el flujo de reacción de

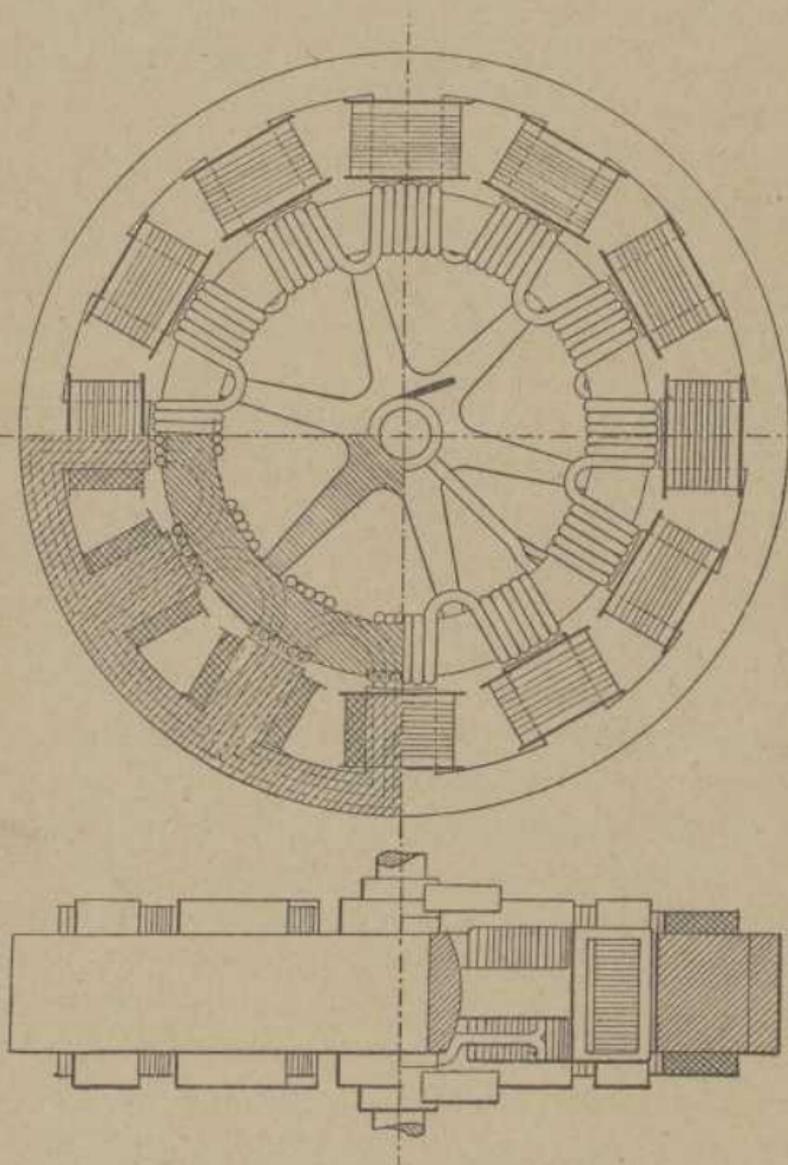


Fig. 9. — Alternador multipolar, con inducido de anillo, visto de frente y de perfil

todas ellas se sumaría, y encontrando circuito cerrado y permeable a todo lo largo del anillo, adquiriría gran importancia en perjuicio del flujo principal.

Inducido de disco. — Si el largo axial de la armadura es mucho menor que el espesor radial, la corona del inducido toma la forma de un disco.

Las secciones inducidas pueden arrollarse en forma de espiral (fig. 10) o en forma de hélice abrazando el disco como un anillo (fig. 11).

Siendo el largo axial del inducido de disco tan reducido, la sección que presentaría al paso del flujo, con inductor exterior concéntrico, sería muy pequeña. La sección del circuito magnético se hace todo lo grande que convenga empleando, para ese tipo de inducido, un inductor especial formado por dos grupos de electroimanes montados sobre dos culatas de disco a uno y otro lado del inducido, con las piezas polares concordantes en polos de signos contrarios y mirando al inducido, como se ve en las vistas de perfil de las figuras 10 y 11. En ellas está indicado el camino del flujo por líneas de trazos.

Entrando el flujo por la cara del disco y atravesándolo axialmente, no podrá formarse la corona del inducido empilando disco de plancha de palastro, como en las armaduras de tambor y de anillo, pues tal construcción cortaría el camino del flujo sin cortar el circuito de las corrientes de Foucault, que es precisamente lo contrario de lo que debe ser. Se consigue resolver ese problema, en los

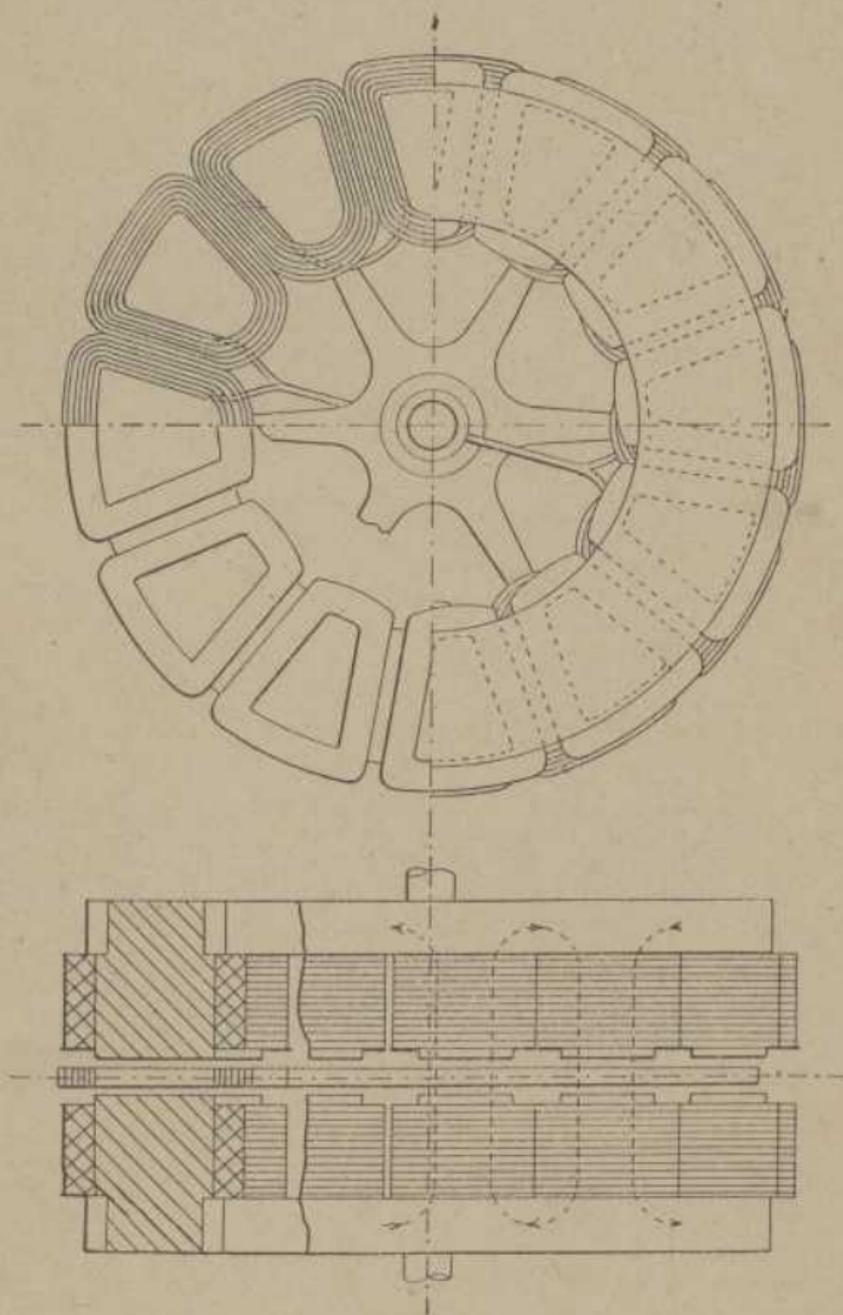


Fig. 10. — Alternador de inducido de disco

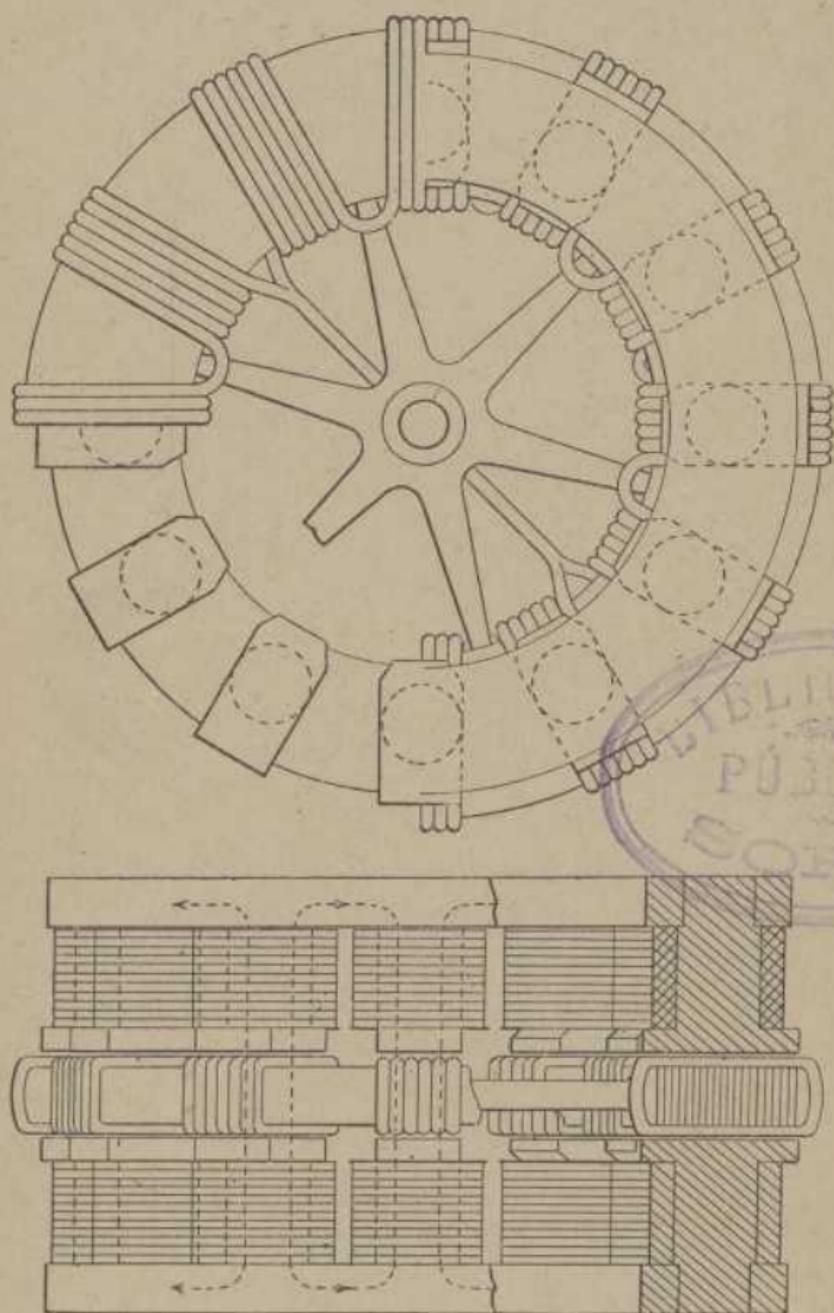


Fig. 11. — Alternador de inducido mixto, es decir, de anillo discoidal

inducidos de disco, formando la corona de la armadura con cinta de palastro aislada por una cara y arrollada en espiral apretada, hasta alcanzar el espesor radial preciso.

En los inducidos de disco, el hierro de la armadura se reduce a un mínimo, y así llegan casi a anularse las pérdidas de histeresis (tomo I, cap. III) y las de Foucault (tomo II, cap. III).

Sin embargo, esas ventajas del inducido de disco no compensan el inconveniente de tener que emplear grandes inductores, debido principalmente al mucho entrehierro que deben tener los alternadores de ese tipo para que el disco no roce con las piezas polares al abarquillarse ligeramente en su superficie lateral.

Un generador con grandes inductores, supone un gran gasto de energía en la excitación y, como consecuencia, un rendimiento bajo; por eso los alternadores de inducido de disco han caído en desuso.

Inductores. — El tipo de alternador que estamos estudiando en ese capítulo, o sea el alternador de inducido móvil, tiene el inductor fijo envolviendo al inducido que se mueve en su seno.

El inductor fijo es siempre exterior, y está formado por una corona cilíndrica de electroimanes concéntrica con la del inducido, si éste es de tambor (fig. 8) o de anillo (fig. 9), y está constituido por dos coronas discoidales de electroimanes paralelas y laterales al del inducido cuando éste es de disco (figs. 10 y 11).

Sólo en el caso de generadores muy pequeños se emplea el inductor magnético, formado por imanes permanentes de acero. Esos generadores, llamados *magneto*, son de flujo constante y en ellos la variación de fuerza electromotriz (fórmula [3]) sólo puede conseguirse por variación de velocidad n , lo cual trae aparejado una variación de frecuencia f (fórmula [1]).

Los alternadores industriales deben funcionar a tensión regulable y frecuencia constante, por lo tanto en ellos debe disponerse de un flujo susceptible de variación. Se consigue esto con inductores electromagnéticos, únicos que se emplean en alternadores de alguna potencia.

Excitación. — Los electroimanes del inductor han de producir un flujo continuo y para eso deben ser alimentados con corriente continua o de signo constante.

La corriente continua para la excitación procede, en general, de una pequeña dinamo llamada *excitadora*, que puede ser independiente del alternador o mejor, acoplada a su mismo eje para suprimir transmisiones.

La corriente de signo constante o enderezada, se obtiene mediante un rectificador de corriente alterna alimentado de la misma corriente del alternador; consiguiendo así una autoexcitación.

Como ejemplo de rectificador sencillo estudiemos el tipo representado en la figura 12, que se ha preparado para un alternador de ocho polos. Sobre el eje del alternador se monta un colector

de delgas con tantas delgas como polos tiene el alternador; así las delgas 1, 2, 3, ... y 8 están separadas entre sí un paso polar y las escobillas apoyadas al colector cambiarán de delga a cada paso polar de giro o alternancia de la corriente. Las delgas de lugar impar 1, 3, 5 y 7, están unidas eléctricamente

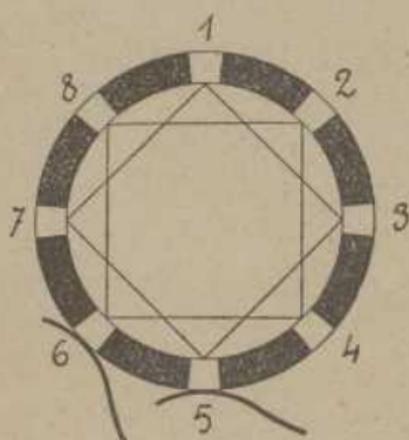


Fig. 12

a un borne del inducido, y las delgas de sitio par 2, 4, 6 y 8, se han unido al otro borne. Las escobillas comunican con el inductor y se apoyan en delgas contiguas para que en todo momento mientras una comunice con las delgas pares, la otra se apoye en las impares.

A cada alternancia de la corriente las escobillas cambian de delga, pasando la de lugar par a impar y la de impar a par, así invierte la comunicación de inducido e inductor, el cual recibe por ese artificio una corriente senoidal enderezada para el mismo sentido.

El empleo de enderezador de corriente para la autoexcitación de alternadores es poco práctico, a pesar de lo sencillo del procedimiento; pues la corriente que suministra no es de intensidad constante y así el flujo y la tensión resultan muy variables.

Cuando el alternador de inducido móvil tiene el devanado de dínamo, puede adaptarse a una de sus caras el colector de anillos, para llevar la co-

corriente alterna al circuito de consumo, y en la otra cara un colector de delgas para sacar corriente continua de excitación.

La variación de flujo en los electroimanes inductores se obtiene variando la corriente inductora por medio de un reóstato regulador $s t$ (fig. 13) en serie con el devanado inductor $J K$.

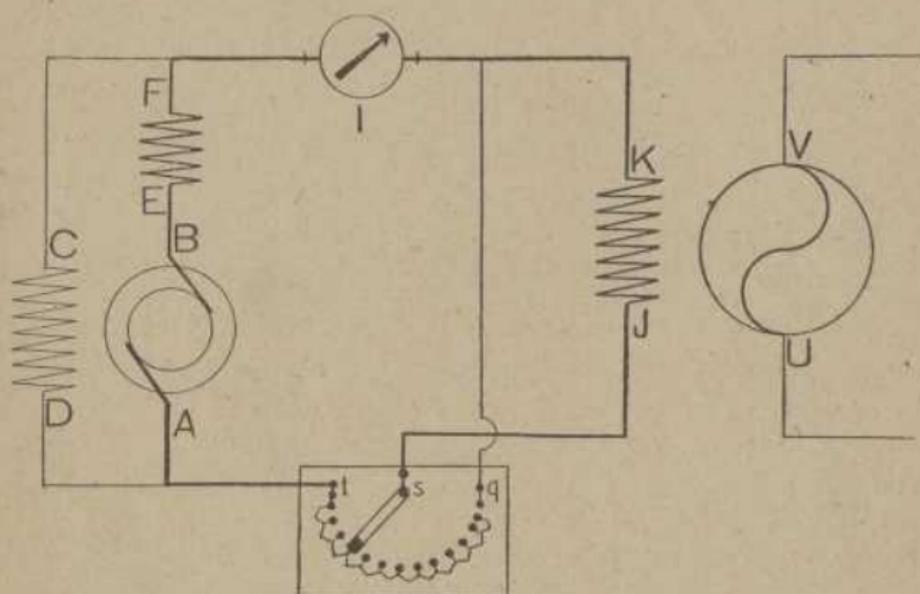


Fig. 13

Al disminuir la tensión en los bornes $U V$ del alternador, debido a un aumento de carga, se puede restablecer la tensión de régimen moviendo la palanca s hacia t , para disminuir la resistencia del circuito inductor y aumentar su corriente. Las indicaciones del amperímetro I , comprueban si el movimiento de la palanca ha sido adecuado.

Recíprocamente, cuando una disminución de carga produce un aumento sobrenormal de tensión,

basta mover la palanca del reóstato en sentido g , para obtener un descenso en la tensión.

A fin de que las variaciones de flujo en el alternador dependan exclusivamente de la resistencia st , se da a la dínamo excitadora, excitación compuesta, para así tener constante su tensión, independientemente de la corriente de $J K$. En el esquema está representado el inducido de la dínamo por $A B$; su inductor serie, por $E F$ y el derivado, por $C D$.

El hilo que sale del borne g del reóstato, es el denominado *hilo apagachispas* o *hilo de protección*. Sirve para cerrar en corto circuito al inducido $J K$, cuando se interrumpe la corriente inductora, dejando así paso a la *corriente de ruptura* (tomo I, capítulo IX) y evitando la chispa que quemaría los bloques del reóstato y la sobretensión de auto-inducción que podría quemar los aislantes del devanado inductor.

Tipos industriales de alternador. — Para que nuestros lectores puedan observar algunos detalles de construcción, que siempre se omiten en el dibujo esquemático, publicamos a continuación algunos clichés de alternadores industriales de inducido movable.

La figura 14, pertenece a un alternador de doce polos construido por la casa *Mather y Platt*, de Manchester. En primer término se ve la dínamo excitadora, tipo Manchester, unida al mismo eje del alternador. Entre la excitadora y el inducido movable, pueden verse los anillos del colector y sus escobillas.

La figura 15, pertenece a un alternador de la casa *Westinghouse*. El inductor es de catorce polos formado por una corona cilíndrica de fundición

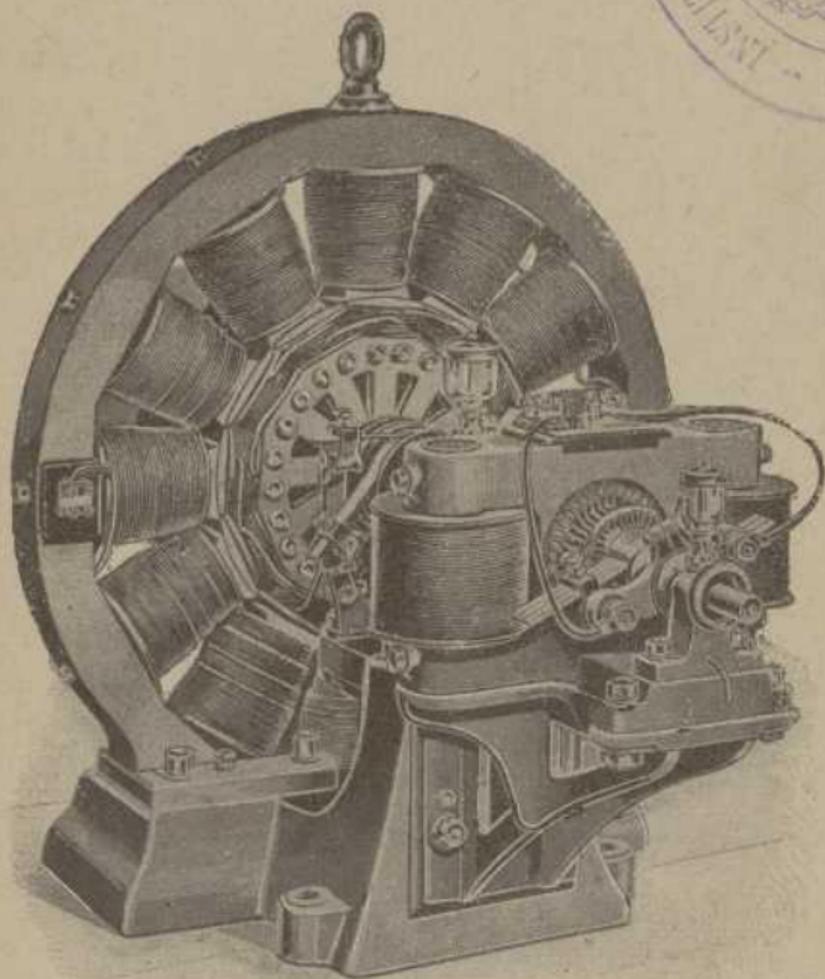


Fig. 14. — Alternador *Mather y Platt*

que sostiene catorce electroimanes. El inducido es de tambor y móvil. A la izquierda del alternador está la dinamo excitadora y en la figura se ven claramente los conductores que llevan la corriente de

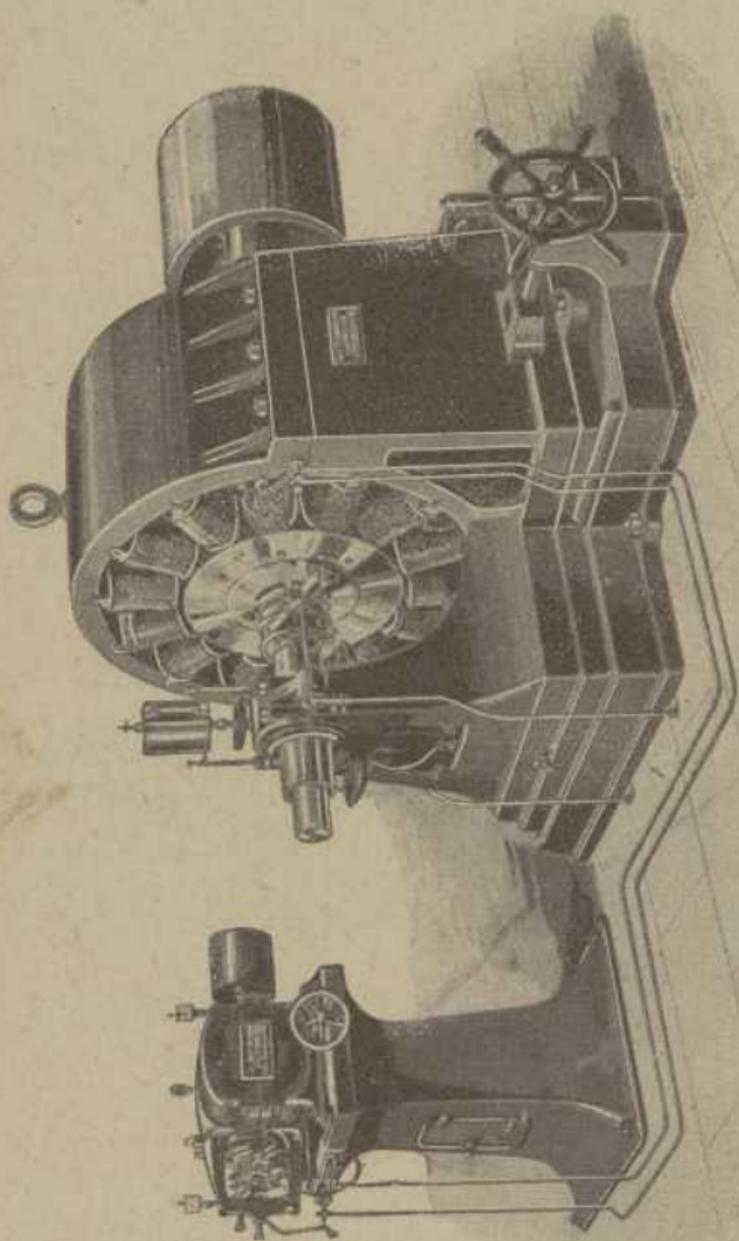


Fig. 15. — Alternador Westinghouse

excitación al inductor y los que, desde el colector de anillos, llevan la corriente inducida atravesando el suelo junto al soporte visible. La dinamo excitadora es independiente del alternador y debe re-

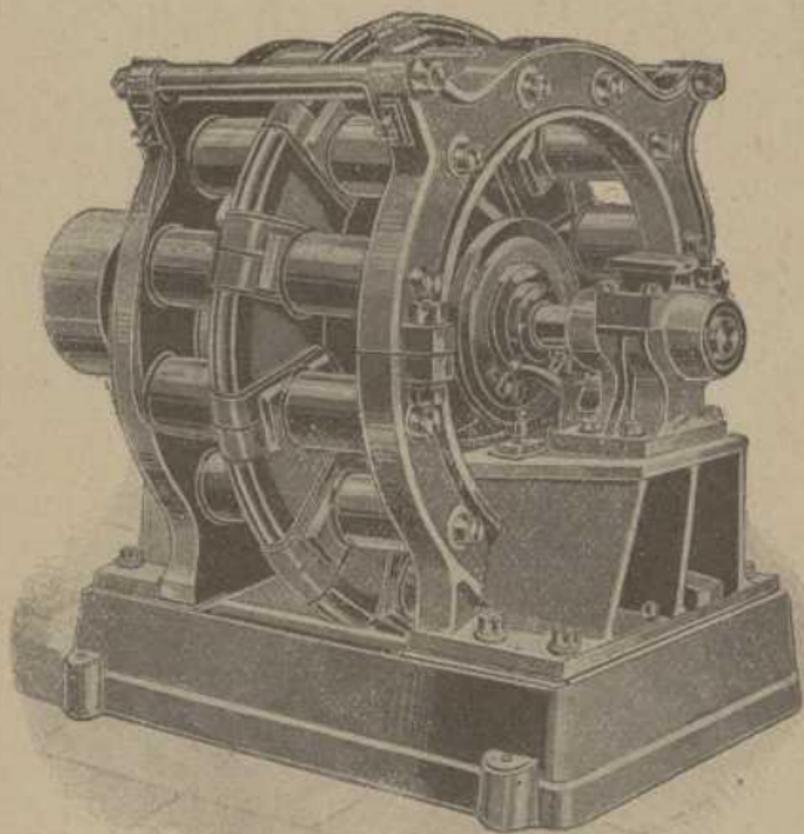


Fig. 16. — Alternador Kapp

cibir el movimiento de éste mediante correa sin fin. Delante del zócalo del alternador se ve el tornillo de volante que ha de servir para atirantar la correa môtora que debe mover la polea del alternador, situada a la derecha de éste.

La figura 16, es un alternador *Kapp* de inducido disco, con doce polos y doce secciones inducidas. El inductor, lo forman dos coronas discoidales de polos divididas por su mitad horizontal, a fin de facilitar la limpieza, transporte y reparación del alternador. Los núcleos de los electroimanes inductores están unidos a sus culatas por tornillos de presión, que los hacen fácilmente desmontables. El colector es á formado por dos coronas circulares, de distintos diámetros, concéntricas y aisladas entre sí formando disco; las escobillas se apoyan en la superficie lateral del colector que actúa de superficie de contacto. La dinamo excitadora es independiente y no está representada en la figura.



CAPÍTULO II

ALTERNADORES DE INDUCTOR MOVIBLE

Sus ventajas. — El alternador de campo magnético giratorio puede tener y tiene las espiras inducidas fijas, ya que moviéndose el campo inductor se tiene en ellas variación de flujo y por ende corrientes inducidas. Este tipo de alternador tiene, pues, el inductor movible y el inducido fijo.

Siendo estático el arrollamiento inducido, como lo es el circuito alimentado, podrán estar directamente unidos los bornes de uno y otro circuito, sin intermedio de colector de anillos.

En el capítulo anterior dijimos que el colector de un inducido móvil era el punto flaco del circuito y que sólo podía aceptarse su empleo en *generadores de baja tensión*. Quedando suprimido el órgano colector en los inducidos estáticos, los alternadores de este tipo podrán producir *corriente de alta tensión* sin peligro de chispas en los bornes, siendo ésta la principal ventaja de los alternadores de inductor movible, y que en muchos casos economiza el empleo de transformadores.

La mayor tensión que puede obtenerse directamente en un alternador depende del mayor o menor aislamiento de sus ranuras y devanado inducido; en general, se construyen alternadores de inducido movable hasta 10,000 voltios, recurriéndose al empleo de transformadores (tomo VIII) para tensiones superiores.

En toda máquina debe reducirse el órgano movable todo lo posible con el fin de rebajar las pérdidas por rozamiento, que siempre produce un móvil en el aire y en los cojinetes que sostienen su eje de giro. El inductor movable de un alternador no puede escapar de esa regla general, y por eso los alternadores de ese tipo tienen el inductor interior, como concentrado en el árbol de la máquina, y el inducido exterior envolviendo al inductor para recoger su flujo que sale radialmente de sus polos.

Siendo el inducido estático exterior, presenta mayor perímetro y más sitio para el devanado. El número m de espiras inducidas podrá ser grande y, con la misma sección de circuito magnético para igual flujo \mathcal{N} , tendremos mayor tensión (fórmula [3]); además, la abundancia de sitio permite hacer el inducido con varios devanados para tener un alternador polifásico, siendo esto otra ventaja del alternador de inductor movable.

Inductores. — El tipo general de inductor movable lo forma una rueda de varios radios (fig. 17) cuya llanta lleva tantos electroimanes como polos debe tener el alternador. El devanado de todos los electroimanes, que forma polos concéntricos de signo

contrario, está unido en serie y las conexiones de sus dos extremos bajan, por uno de los radios y por encima del eje, a dos anillos colectores montados en el eje y por los que reciben la corriente continua de excitación.

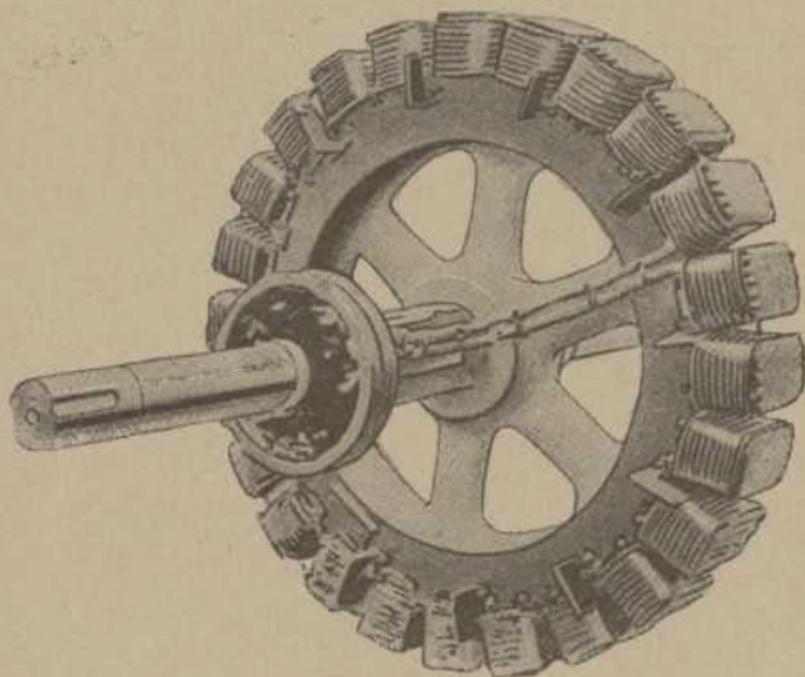


Fig. 17

La llanta del volante suele ser de acero fundido o forjado y forma la culata del circuito magnético.

Los núcleos y expansiones polares de los electroimanes pueden ser:

De acero forjado formando un solo cuerpo con la culata;

De acero forjado en pieza separada y enroscada a la culata;

De planchas de palastro aisladas y empiladas en paquete sujeto a la culata por cola de milano:

De planchas formando paquete unido a la culata por tornillos radiales.

Los alternadores modernos funcionan a un elevado número de revoluciones, principalmente cuando van acoplados directamente a una turbina en instalaciones hidroeléctricas de salto elevado, hoy día tan generalizadas.

Una velocidad grande en el rotor produce enorme fuerza centrífuga en sus polos, que llega a traspasar la respetable cifra de un millón de kilos en polos de 1000 Kg. que marchen a mil revoluciones por minuto. Esta poderosa fuerza centrífuga determina una carga enorme sobre la llanta del rotor y las sujeciones de los polos, y para la seguridad del servicio deben tener estas partes una construcción esmerada y en ella sólo pueden emplearse materiales de la mejor calidad.

Según la velocidad y dimensiones del rotor, se escoge el tipo de polo y sujeción más apropiado, entre los cuatro tipos que hemos señalado y cuyas características principales vamos a estudiar.

En alternadores de cuatro o seis polos, 1500 ó 1000 revoluciones a 50 períodos (fórmula [I]), se emplea el tipo de inductor con núcleos de acero formando un solo cuerpo con la culata. En este tipo la parte más pesada, y por lo tanto, la que sufre mayores esfuerzos tangenciales, forma un cuerpo rígido casi indeformable y muy a propósito para vencer la fuerza centrífuga, que llega a ser muy grande en máquinas de esta velocidad

Con cuatro polos, la culata toma la forma de un cubo que aprisiona al eje (fig. 18) y de cuyas caras axiales parten los núcleos *N* a modo de radios. Estos núcleos pueden ser de sección cilíndrica o de sección rectangular, según que el cuerpo de la culata sea un cubo aproximado o resulte un prisma de mayor altura que base.

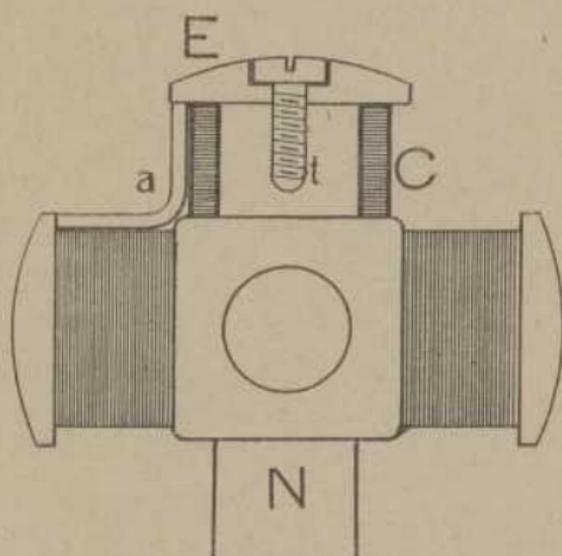


Fig 18

En este tipo de inductor la expansión polar *E* debe ser una pieza suelta para sujetarla al núcleo después de entrado el carrete inductor *C*.

Los expansores *E* tienen sección rectangular, suelen ser de acero forjado y se unen al núcleo por medio de grandes tornillos *t* de acero, en número de dos o tres según el largo axial de los núcleos.

Algunas veces, a fin de disminuir las corrientes

de Foucault, se construyen las expansiones polares prolongando los núcleos por lo alto de los carretes y abriendo en sus cabezas unas muescas en el sentido de giro. La expansión polar se forma con paquetes de planchas que se encajan a presión en las muescas del núcleo y se aseguran por medio de varillas de acero que, clavadas a través de las planchas y de las paredes de las muescas, se remachan en sus extremos, como puede observarse en la figura 17.

Los carretes inductores quedan aprisionados entre la culata y la expansión polar, libres de todo movimiento radial. El devanado es de cinta de cobre y, a fin de evitar la rotura de sus espiras por fuerza centrífuga, se coloca en los entrepolos (figura 18) una escuadra *a* de aluminio que, sujeta con tornillos a los expansores, llena los intersticios polares, comprime las espiras de los carretes y une todas las expansiones polares formando un collar prismático.

En las máquinas de seis polos se sigue la misma construcción sin más variante que la culata que pasa de cubo a prisma exagonal.

Cuando el alternador tiene más de seis polos, y por lo tanto, el rotor da menos de 1000 revoluciones por minuto, la acción expansiva de la fuerza centrífuga se reduce, no precisando una construcción tan sólida del rotor para que esté suficientemente protegido. En tal caso se adopta el tipo de inductor movable de polos roscados.

En este tipo los núcleos son siempre de sección cilíndrica, formando núcleo y expansión una sola

pieza de acero forjado que termina en espiga con paso de rosca ajustada a la culata.

La figura 19, es un rotor de doce polos con núcleos roscados, construido por la Siemens Schuc-

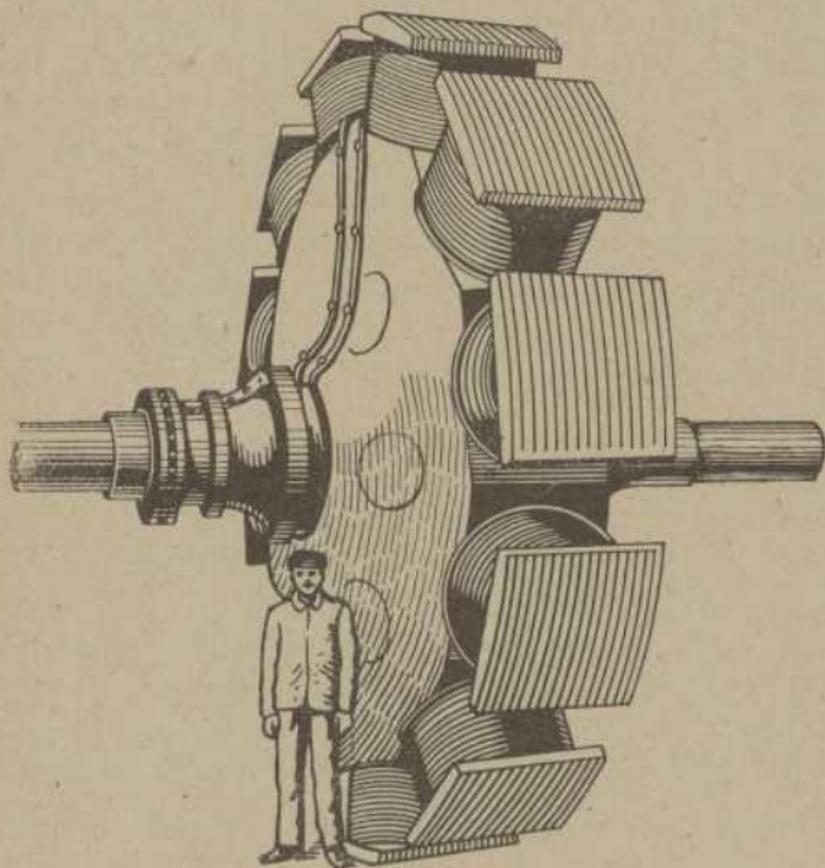


Fig. 19

kert — Industria Eléctrica, para un generador de 12000 K. V. A. a 25 períodos, que corresponde a 250 revoluciones por minuto.

Los núcleos cilíndricos llevan un clavito corto de seguridad ajustado a la culata que impide

cualquier movimiento de rotación alrededor de su eje.

El empleo de núcleos de acero da gran solidez al rotor, condición muy apreciable cuando se trata de máquinas de elevado número de revoluciones; pero a cambio de esa propiedad presentan el inconveniente de permitir el desarrollo de las corrientes de Foucault que, consumiendo una parte de la energía, hacen bajar el rendimiento del alternador.

En efecto, si comparamos la posición *A* y la *B* de un polo (fig. 20) veremos que la distribución de

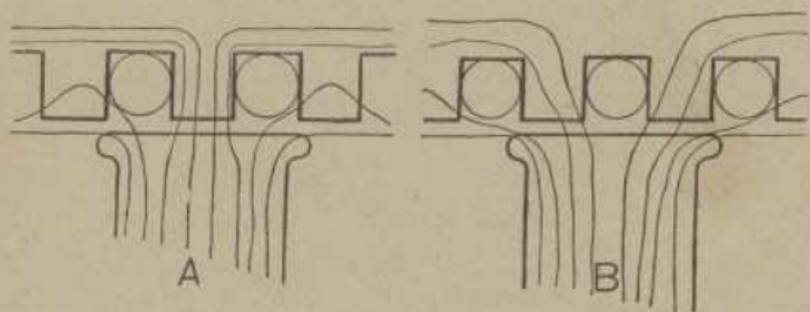


Fig. 20

líneas de fuerza del campo magnético no es la misma cuando el polo está frente el mayor número de dientes que cuando cubre el mayor número de huecos. Desplazándose las líneas de fuerza por el interior del núcleo y de la expansión polar, los distintos puntos de estas piezas estarán sometidos a la acción de un flujo variable, cuya variación da origen a corrientes de Foucault (tomo I, cap. IX) que podrán desarrollarse perfectamente cuando los

núcleos y expansiones sean de acero forjado o fundido.

Para disminuir la pérdida que producen las corrientes de Foucault se recurre al empleo de polos laminados, siempre que la velocidad del rotor lo permite.

La figura 21 es un polo formado con planchas de palastro terminadas en un apéndice en forma

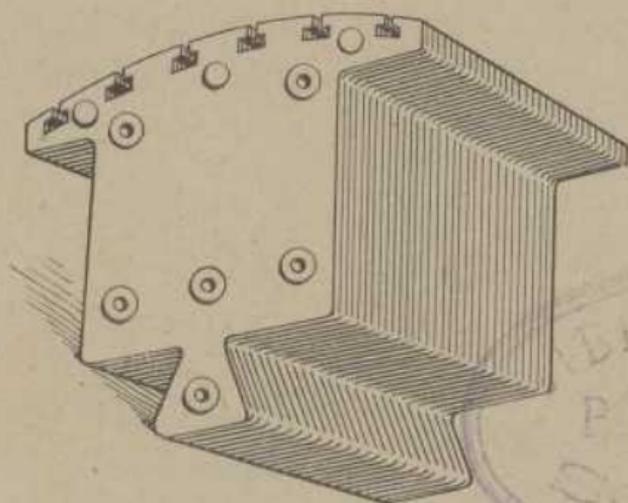


Fig 21

de cola de milano apropiado para encajarlo a la culata. Las planchas cortadas con matriz, todas iguales, y empiladas forman un paquete prensado por dos platinas extremas unidas mediante nueve pasadores con tuercas en cada cara. Los pasadores se visten con tubo de cartón para que al atravesar las planchas no las unan en corto circuito.

La expansión polar tiene seis ranuras axiales que cortan el camino del flujo de reacción disminuyendo sus efectos.

El cuerpo de la culata (fig. 22) presenta unos canales que sirven de caja a la cola de milano del polo. Los polos, provistos de sus carretes, entran por el extremo de un canal y se deslizan a su largo hasta quedar centrados con la culata o con el empilado del estátor. La sujeción del polo se asegura

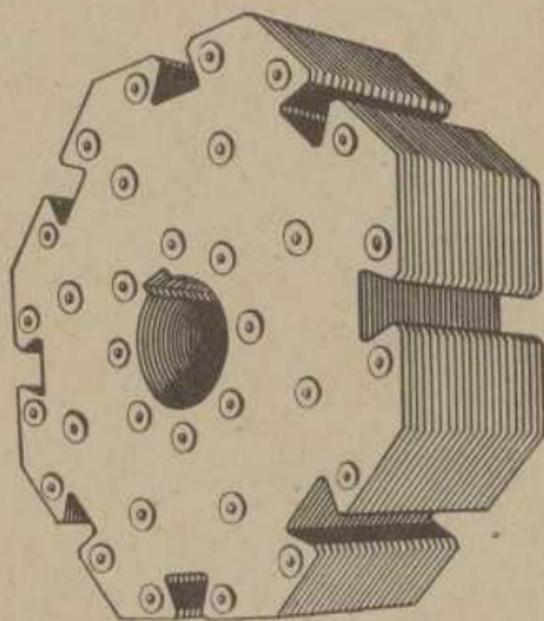


Fig. 22

con cuñas dobles metidas por los lados o por debajo de la cola de milano.

La fijación de los polos por cola de milano ofrece una seguridad absoluta dentro de velocidades medias y hace posible una rápida colocación o recambio de los polos y un centrado magnético perfecto.

El cuerpo de la culata puede ser de planchas, como el de la figura 22, o de acero fundido o for-

jado, y llega hasta el eje, sobre el que se fija con chaveta, cuando su diámetro es pequeño, mientras que con diámetros grandes se forma de un anillo de acero colocado en caliente sobre rueda de brazos (fig. 17). La contracción del anillo se procura que sea mayor que la dilatación que puede experimentar sometido al número de revoluciones más elevado.

En máquinas grandes la rueda polar se compone de varias piezas y la culata de varios anillos paralelamente unidos. De esta manera, aparte de facilitar el manejo de piezas durante la fabricación, es más seguro que no se presenten sopladuras en la fundición del acero y que los posibles defectos del material se descubren así con más facilidad durante la fabricación ya que los anillos y piezas se trabajan en todas sus caras.

Fijados los polos por cola de milano, las fuerzas centrífugas que se originan en ellos cargan sobre la base anular de las partes salientes que se encuentran entre las hendiduras de la cola de milano, además estas partes cargan el cuerpo anular con su propia fuerza centrífuga y por esa razón la construcción con cola de milano requiere un gran recargo de material que conduce necesariamente a pesos considerables.

Para hacer más ligera la construcción del rotor se adopta la fijación de polos por tornillos radiales.

La figura 23, muestra un polo de planchas con la base planeada y provista de dos tornillos de presión roscados en el paquete de planchas.

Sobre la llanta de una rueda, de radios simples o dobles, se colocan los polos rovistos de su carrete y por medio de los tornillos pasantes se fijan los polos desde el interior de la llanta. Los tornillos radiales de sujeción se aseguran cuidadosamente para que no se suelten por sí solos.

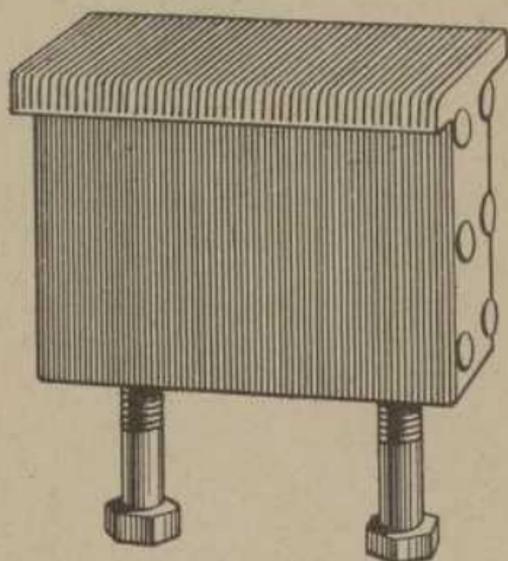


Fig. 23

Una variante de este sistema de sujeción es la empleada por la casa Erlikon (fig. 24). Entre polo y polo se dispone unas piezas de acero de sección trapezoidal que se sujetan a la llanta por medio de dos tornillos que la atraviesan. Los núcleos tienen en su base dos hendiduras laterales en forma de cola de milano que son aprisionadas por la pieza sujeta a la llanta. Los carretes están arrollados sobre manguitos de latón de hueco mayor que

el núcleo, y el espacio que dejan entre sí se utiliza como canal de ventilación.

Esta construcción facilita el montaje y recambio de los polos, como también su centrado magnético con el estátor.

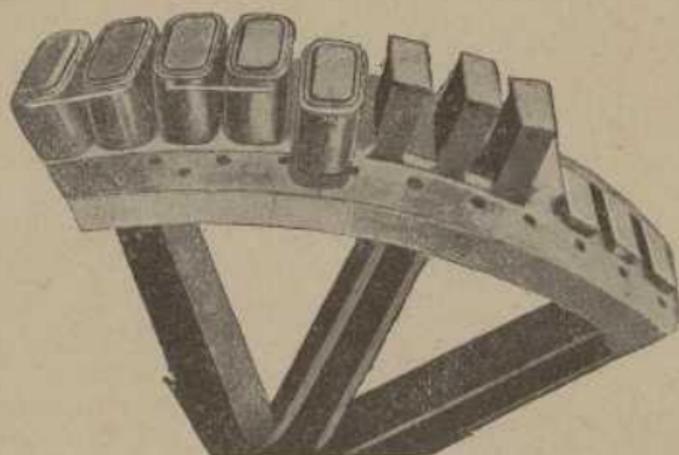


Fig. 24

Carretes. — El devanado de los polos es de cobre plano, forma cinta, arrollado de canto (fig 25, A) y aislado con cinta de algodón o de papel impregnado. Las espiras se arrollan sobre tubo de cartón prensado e impregnado de barniz aislante para aislar el carrete del hierro.

Los carretes así contruídos son cilíndricos y poseen gran estabilidad y dimensiones reducidas. Como están devanados en una sola capa, todas las espiras tienen una cara en contacto inmediato con el aire y se obtiene una refrigeración rápida.

Si la excitación es de muy baja tensión, se hace el devanado de los polos con cobre desnudo sepa-

rando las espiras planas con papel impregnado y dejando en la superficie externa del carrete el cobre al descubierto, lo cual facilita un enfriamiento intenso.

La expansión polar prensa el carrete en el sentido del eje, impidiéndole todo movimiento o cambio de posición.

Cuando la corriente inductora es pequeña, se devanan los carretes con hilo de cobre (fig. 25, B)

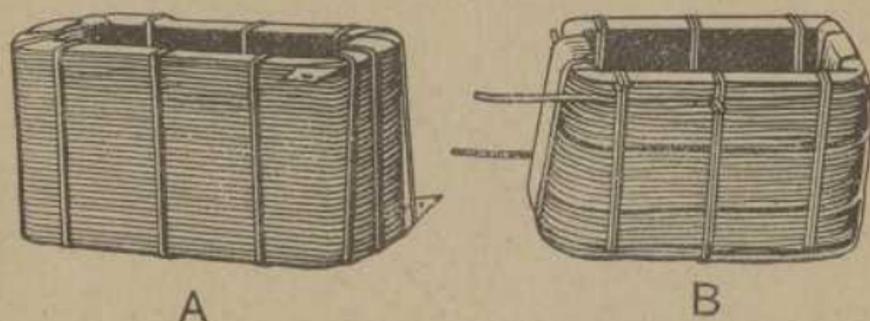


Fig. 25

y se forman de capas escalonadas con diferente número de vueltas a fin de darles una superficie externa en forma de tronco de pirámide. Los carretes así contruídos presentan mayor superficie de refrigeración y aprovechan mejor el sitio de entrenúcleos.

Las conexiones de los carretes deben tener una sección exagerada, en atención a la seguridad mecánica que deben poseer, y además suelen sujetarse con pernos atornillados a la culata del rotor. Asimismo, las conexiones extremas con los anillos del colector se sujetan al cuerpo del rotor con abra-

zaderas de acero y al eje por medio de cinchos (figuras 17 y 19).

Colector. — Los anillos del colector son de bronce endurecido y van montados al aire en pernos aislados que los sujetan a un collar sujeto con chavetas al mismo eje de la máquina. Esta construcción facilita en gran manera el enfriamiento de los anillos ya que están en contacto directo del aire en toda su superficie.

Cada anillo está alimentado, cuando menos, por dos escobillas de carbón bronceado sostenidas por portaescobillas de muelle que, a su vez, se sostienen en pernos aislados y fijos a un soporte de la máquina. El desgaste que producen a los anillos es casi nulo y además tienen éstos espesor bastante que permite tornearlos varias veces, en caso de producirse un desgaste irregular.

Esta operación puede efectuarse sin desmontar el colector, basta montar una brida al soporte contiguo para servir de apoyo a la cuchilla tornera.

En las grandes máquinas, el collar y los anillos se parten en dos para facilitar su montaje, y en los pequeños alternadores los anillos, enteros y de diámetro interior poco mayor que el del eje, se montan sobre manga de fibra o de cartón y sujetan con platos de hierro interponiendo entre éstos y los anillos y entre los anillos, discos sobresalientes de cartón o de fibra.

Equilibrio estático del rotor. — Todo rotor, una vez montado, es sometido a la prueba de *equilibrio estático*. Esta prueba se reduce a colocar el rotor

sobre dos carriles paralelos en posición horizontal y moverlo ligeramente para comprobar si tiene predilección por quedar en reposo siempre a la misma posición.

Si tal ocurre es que las cargas de material no están uniformemente repartidas en los distintos radios y el radio más cargado es el que siempre queda en posición vertical por debajo del eje.

Para corregir este defecto se procede a tarar el rotor estáticamente. Esta operación consiste en ir cargando pesos en el extremo superior del diámetro vertical de reposo y tantear si el rotor pierde la predilección de reposo para dicho diámetro.

En general, una vez conseguido que el rotor pierda la preferencia de reposo para un diámetro determinado, se le encuentra nueva predilección para otro diámetro, la cual debe corregirse cargando la parte superior de ese nuevo diámetro.

Cuando se ha logrado que el rotor quede en reposo indistintamente en todas las verticalidades de sus diámetros, se ha conseguido su equilibrio.

Los pesos de prueba se fijan definitivamente sobre su diámetro y en el caso, general, de tenerlos que correr a lo largo del diámetro, en busca de un sitio a propósito para su colocación, se varía el peso en razón inversa a su distancia al eje. Así, por ejemplo, si un rotor queda equilibrado con un peso de prueba de 140 gramos colocado a 1'20 metros del eje, el peso de equilibrio a 0'80 metros será:

$$\frac{x}{140} = \frac{1'20}{0'80}$$

de donde

$$x = \frac{140 \times 1'20}{0'80} = 210 \text{ gramos}$$

Como se ve, para reducir los pesos de tara conviene buscarles un asiento lo más lejos posible del eje.

Según el contorno de la culata se busca un recodo que proteja y oculte al peso de tara. En los rótores de volante el sitio más a propósito para colocar los pesos de tara es la parte interna de la llanta.

Prueba de lanzamiento. — En párrafos anteriores de este mismo capítulo, hemos indicado la importancia enorme que tiene la fuerza centrífuga en los alternadores modernos de inductor movible y lo bien que debe cuidarse la sujeción de las piezas de que consta el rotor y la calidad de los materiales en ellas empleados para obtener un funcionamiento seguro.

El inductor móvil de un alternador, no sólo debe resistir la fuerza centrífuga correspondiente a su velocidad normal, sino que debe soportar sus esfuerzos aunque la velocidad aumente en un 50 por ciento. Esta exigencia debe su origen al hecho de que cuando los alternadores hidroeléctricos se descargan, pueden tomar una velocidad muy superior a la normal antes de que el regulador de la turbina cierre la compuerta con su lento movimiento.

Para mayor seguridad de funcionamiento, todo inductor movible, una vez montado y equilibrado,

se le somete a una *prueba de lanzamiento* haciéndolo girar durante un tiempo determinado con el número de revoluciones prescrito. Según el reglamento de la A. E. A., el tiempo debe ser de cinco minutos y la velocidad un 15 por 100 mayor que la normal.

La prueba de lanzamiento puede efectuarse con el rotor montado en el mismo alternador; pero los talleres bien montados disponen para esa prueba de una cámara especial formada por dos túneles concéntricos blindados y forrados con colchonetas de miraguano, en cuyo centro se mueve el rotor de prueba a la velocidad prescrita.

Cojinetes. — En los alternadores modernos, de velocidad elevada, no se emplean otra clase de cojinetes que los de engrase continuo con anillos engrasadores.

Las grandes máquinas de eje horizontal tienen los cojinetes divididos horizontalmente formando dos casquillos de hierro revestidos de metal anti-fricción.

El soporte asiento del casquillo inferior, es de forma esférica, lo cual permite revisar el cojinete sin retirar el eje. Basta hacer girar hacia arriba el casquillo inferior, después de levantar ligeramente el eje con un gato o una falqueta.

Los depósitos de aceite tienen gran capacidad para facilitar el enfriamiento del aceite y llevan un nivel indicador para ver su contenido y un grifo para el cambio de aceite. Para vigilar la marcha de los anillos de engrase suele haber en la tapa

del soporte ventanas de mira con cierre automático.

Cuando la máquina es de mucho peso y gran velocidad, los cojinetes van provistos de serpentines para la refrigeración por agua.

Al final de los gorriones se disponen unos anillos en forma de ala de mosca que precipitan el aceite hacia el interior del depósito, impidiendo que se corra a lo largo del eje y salte fuera de los cojinetes durante la marcha. Con el mismo fin los casquillos tienen unos surcos interiores que hacen de recogedores de aceite y acaban en dos anillos circulares, uno en cada extremo del cojinete, provistos de un agujero en su parte más baja que deja escurrir el aceite al depósito.

Con el fin de disminuir el peso de la máquina, amortiguar sus vibraciones y dejar los cojinetes al alcance de fácil inspección, se acorta la altura de los soportes haciendo que parte del alternador quede por debajo del nivel del suelo encajada en un hoyo abierto en la fundación (figs. 31 y 34).

Inducido. — Hemos dicho, al principio de este capítulo, que el alternador de inductor móvil tiene el inducido fijo y exterior, y que está envolviendo al inductor del que recibe el flujo que sale radialmente de sus polos.

Entre los inducidos fijos no hay más tipo que el de tambor; en ellos las secciones inducidas deben alojarse en la superficie cilíndrica interna de la corona (fig. 26), que en este caso es la superficie activa por ser la contigua a los polos inductores

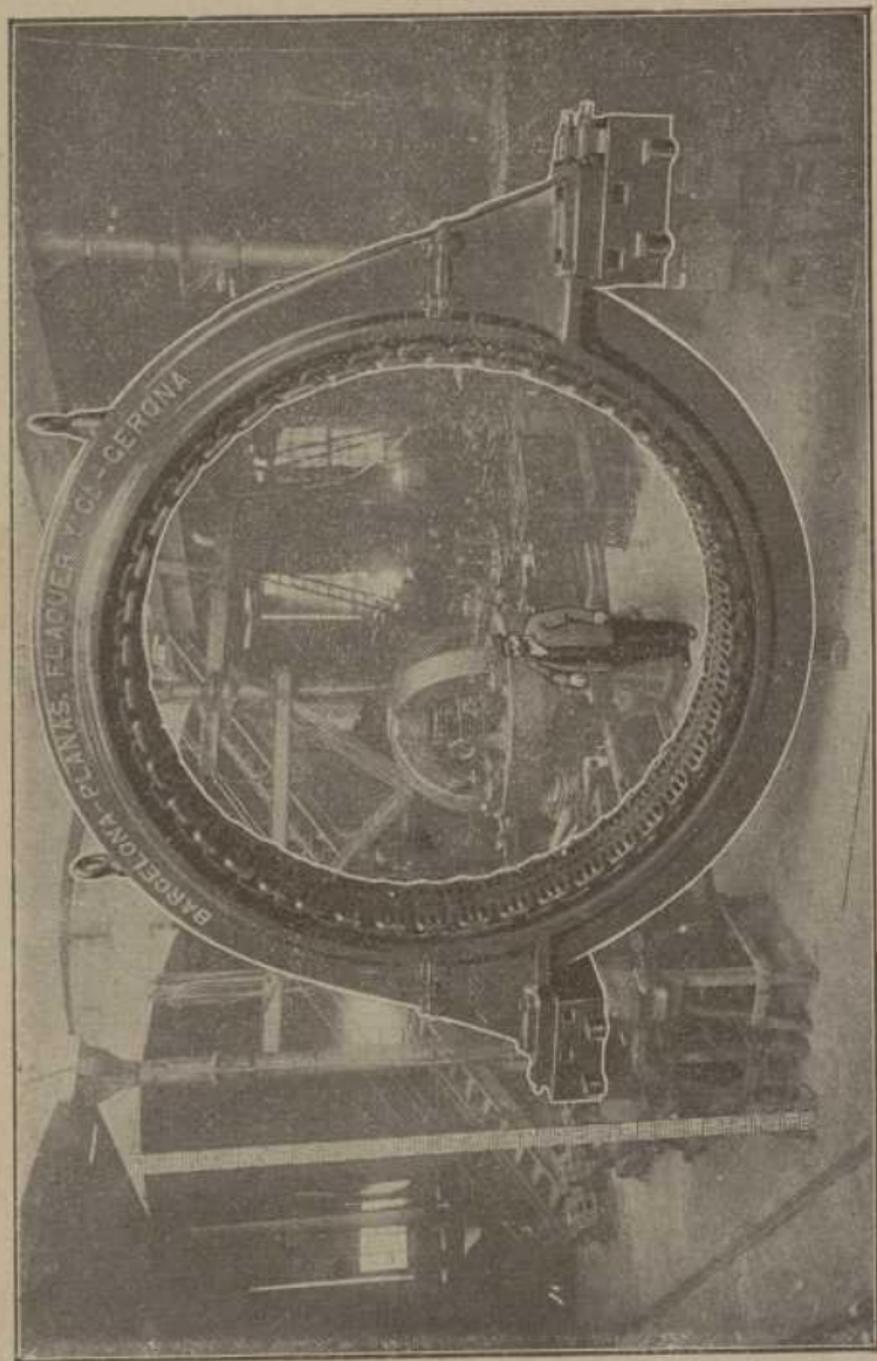


Fig. 26. — Alternador trifásico. Parte fija

así como en los inducidos móviles era la superficie externa (pág. 22). Es esta casi la única variante entre los inducidos de tambor móvil y de tambor fijo.

Su armadura, formada por empilado de chapas de palastro como los inducidos móviles, tiene la superficie activa ranurada y sus chapas pueden

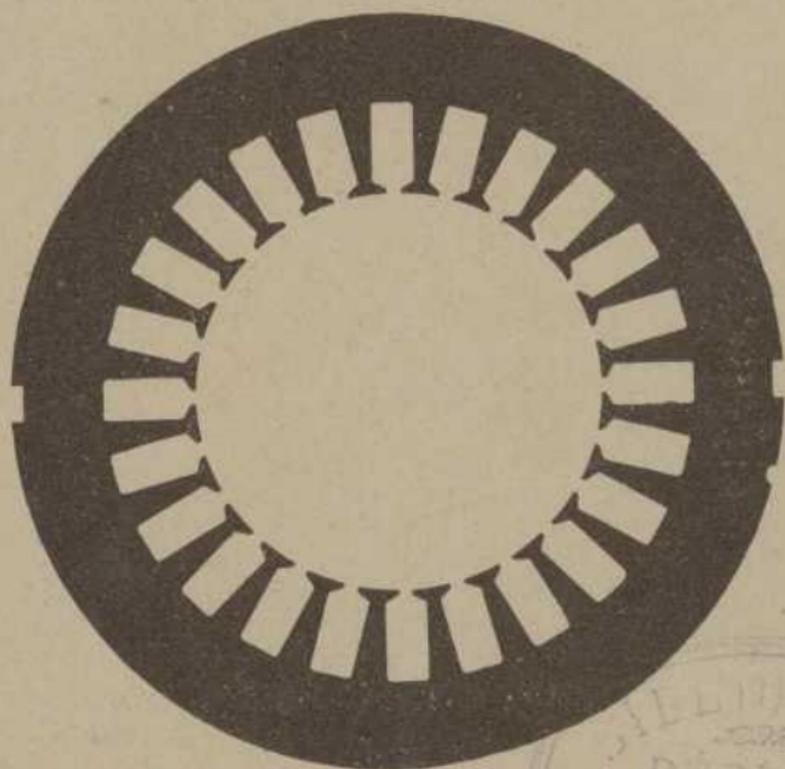


Fig. 27

formar la corona con una sola pieza anular (fig. 27), cuando el alternador es de diámetro muy pequeño, o con varias piezas cortadas a matriz en forma de segmentos y empiladas de manera que cerrando

BIBLIOTECA
PÚBLICA
SORIA

círculo coincidan las ranuras de todas y que las juntas de dos piezas de una capa queden siempre cubiertas por las piezas de la capa siguiente.

Las secciones inducidas se sostienen siempre, en los inducidos fijos, por medio de cuñas de madera, y las ranuras son semicerradas, como las de la figura 27, o completamente abiertas de caras paralelas. En el tipo de ranuras semicerradas, las cuñas se sostienen por los apéndices que entrecierran la ranura. Las ranuras abiertas tienen los dientes terminados en cola de milano y la cuña, más ancha que el hueco, encaja en las hendeduras de dos colas contiguas.

Cuando el largo axil de la armadura pasa de 20 centímetros, se forma el empilado de la armadura interponiendo a distancias reguladas, cada 8 ó 10 centímetros, una chapa provista de regletas de un centímetro de altura radialmente dispuestas con el fin de formar canal para el aire de refrigeración de la armadura y del devanado.

La figura 28 muestra parte del empilado de la armadura de un estátor de alternador, en ella se ven los canales de ventilación en número de nueve que van de dentro a fuera, en sentido radial, en todo el perímetro de la armadura. La corona de chapas está prensada por la presión de las placas extremas mantenida por numerosos pernos aislados.

Las chapas de las caras frontales de los canales de ventilación son ranuradas, pero más fuertes que las otras, con el fin de que al quedar prensadas unas contra otras eviten las vibraciones que sufri-

rían los dientes por la imantación variable del campo magnético, lo que sería causa de un ruido muy subido.

El conjunto de la armadura está envuelto por una armazón hueca de fundición (fig. 26) provista

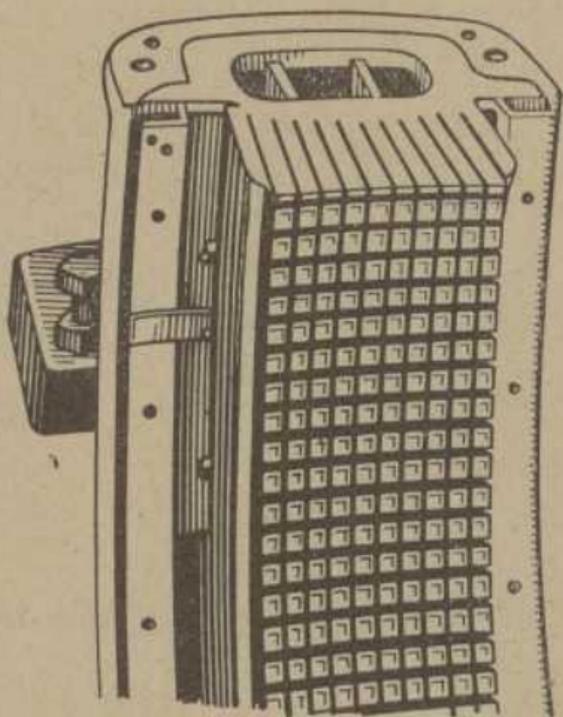


Fig. 28

en su interior de varias regletas transversales que, repartidas por su perímetro, sirven de asiento y sujeción a la armadura. La armazón suele constar de una, dos o más partes según el tamaño del alternador y las dificultades de transporte.

En la parte superior de la armazón hay uno o dos cáncamos o asas a propósito para engancharlos a

una grua y facilitar el transporte, montaje y reparaciones de alternador.

El número de ranuras, cuando el alternador es monofásico, obedece a la misma fórmula [9] de los inducidos movibles (cap. I) y la forma de devanar y conexionar las secciones inducidas es idéntica; como en ellos se puede devanar en una o dos capas, si bien el devanado en dos capas es poco necesario

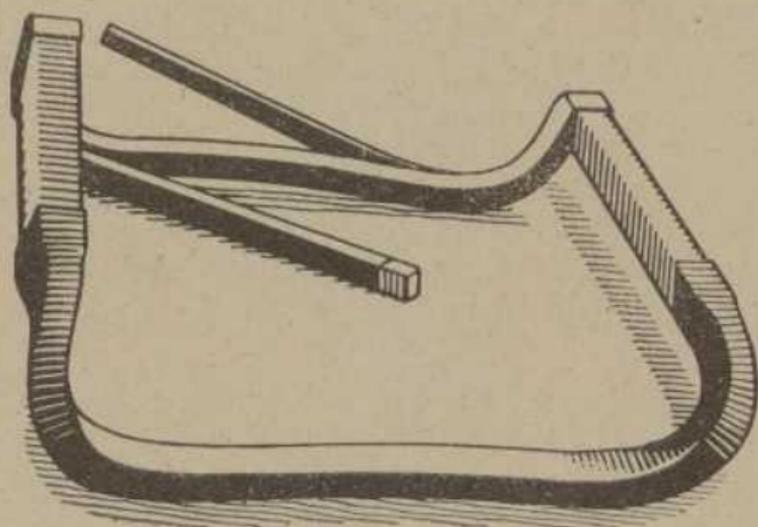


Fig. 29

en los inducidos fijos, ya que su mayor perímetro permite hacer ranuras individuales para cada haz activo o rama.

Cuando el inducido estático tiene las ranuras abiertas, de caras paralelas, las secciones inducidas (fig. 29) se devanan sobre molde y, una vez aisladas sus ramas, se encajan en las ranuras que se cierran con cuña de madera. Esta construcción es la más fácil y a la vez la más apropiada para altas tensio-

nes puesto que el aislante del conductor no sufre daño alguno al arrollarlo sobre molde, y en el caso de quemarse una sección, peligro más probable cuanto mayor es la tensión, se simplifica, con esa construcción, el cambio de la sección quemada sobre el terreno.

Si las ranuras son semicerradas, el devanado de las secciones debe hacerse sobre el mismo inducido. Para ello, después de aislar las ranuras con un tubo de cartón o de mica, y con el fin de que las espiras se coloquen en orden dentro de la ranura, se llenan primero éstas de varillas o agujas, de igual sección que los conductores, y quitando luego ordenadamente las agujas una a una se van deslizando las vueltas del conductor por el hueco que dejan las agujas. La sujeción del haz se completa encajando una cuña de cartón o madera entre el tubo aislador y la abertura de la ranura.

En los alternadores de baja tensión y gran corriente, se hace el devanado en barras y con ranuras semicerradas. Cada ranura aloja un sólo conductor en forma de barra de cobre que se encaja dentro del tubo aislador de la ranura, luego se unen los extremos de las barras con uniones frontales ajustadas con tornillos o soldadas.

Construido el devanado se procede a expulsar el aire y la humedad de sus aislantes para evitar todo peligro de ozonización.

Un devanado húmedo está mal aislado y puede quemarse por corto circuito interior o derivación, que necesariamente se ha de establecer a través de los aislantes cargados de humedad.

Si entre los intersticios del devanado queda aire aprisionado, se ozoniza bajo la acción de los efluvios producidos por las tensiones elevadas y adquiere

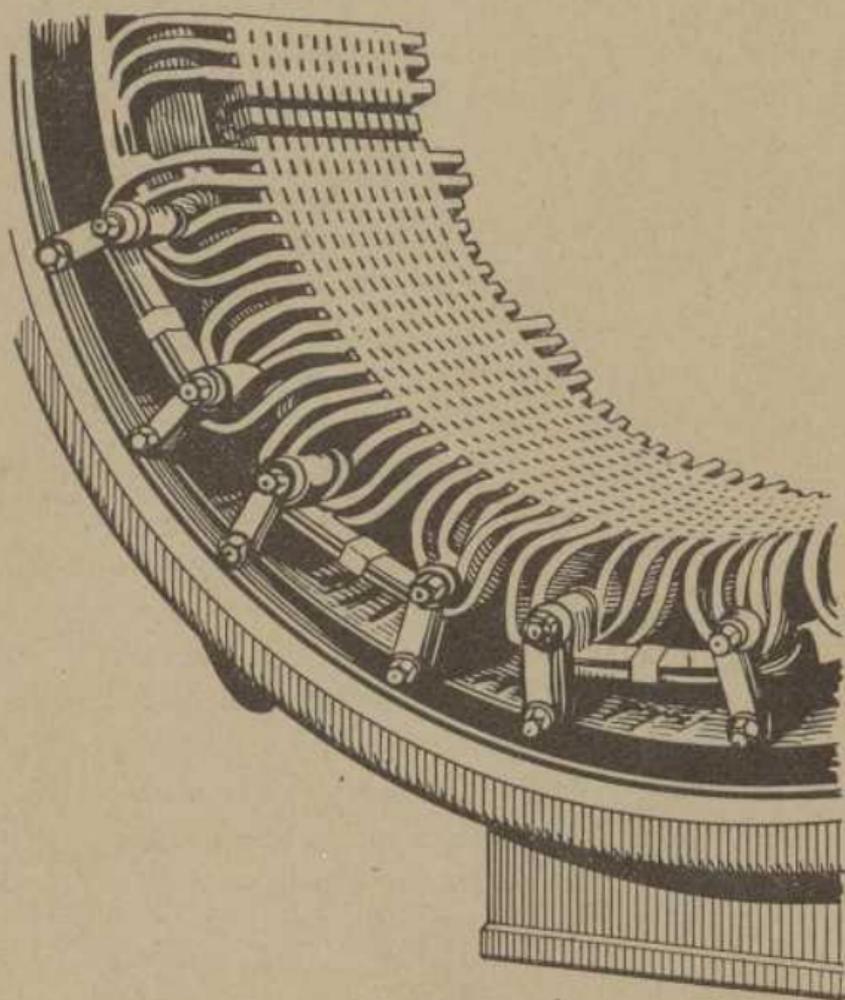


Fig. 30

gran poder oxidante que hace envejecer los aislantes hasta carbonizarios y producir el corto circuito de los conductores.

La humedad y el aire de un devanado se expulsan secándolo en una estufa al vacío y mantenida a la temperatura de 115 grados C. durante un tiempo prescrito, pasado el cual se inyecta un barniz aislante, que impregna con su substancia las secciones del devanado llenando sus intersticios.

Los devanados de ranuras semicerradas se han de someter a las operaciones de secar e impregnar junto con la armadura que los sostiene; en cambio, el devanado de secciones arrolladas sobre molde (fig. 29) puede someterse a dicha operación antes de ser colocado en la armadura, obteniendo gran economía en la operación.

En los alternadores de gran potencia se sujetan las conexiones frontales del devanado por medio de pernos especiales de sujeción y sostén (fig. 30) que, unidos entre sí y a la armadura, dan al arrollamiento una gran solidez que le permite soportar sin deterioro alguno, los enérgicos y bruscos esfuerzos que se producen en las conexiones cuando ocurre un corto circuito o una descarga atmosférica en la línea, fenómeno que determina un crecimiento repentino de la intensidad que causa energética repulsión entre los conductores.

Ventilación. — La fórmula [3]

$$E = 0.074 \phi n m \mathcal{N} 10^{-8}$$

nos dice que la velocidad n del rotor y su flujo \mathcal{N} están en razón inversa, o sea, que aumentando la velocidad, debe disminuir el flujo para obtener el mismo efecto.

Como del valor del flujo dependen las dimensiones del circuito magnético y, por lo tanto, las de la máquina, resulta que en un alternador a mayor velocidad le corresponde menores dimensiones y peso. En efecto, la industria presenta alternadores de igual potencia con dimensiones muy distintas, y en ellos siempre se verifica que a mayor velocidad corresponde menor volumen de máquina.

En todo alternador un tanto por ciento de su potencia se pierde como energía eléctrica transformándose en calor, de modo que alternadores de igual potencia y rendimiento desarrollan el mismo calor; calor que, comunicado por la masa del generador, pasa al aire que actúa de refrigerante en contacto con toda la superficie de la máquina.

Teniendo máquinas de igual potencia, proporciones muy distintas, según su velocidad, los medios de ventilación deben ser variados para perder el mismo calor en superficies de refrigeración muy diferentes. De aquí ha partido la necesidad de crear tres tipos de alternador, referidos a su construcción externa:

Alternadores abiertos.

Alternadores semicerrados.

Alternadores cerrados.

La figura 31, es un alternador Siemens Schuckert — Industria Eléctrica, de construcción abierta con cincuenta polos y 120 revoluciones por minuto; es, por lo tanto, de marcha lenta y de mucha superficie de enfriamiento. En este tipo, el devanado inductor o inducido están al descubierto y la armazón presenta varios agujeros de salida para el

aire caliente de los canales de ventilación; basta la circulación natural del aire, algo favorecida, para tener una refrigeración suficiente.

El camino del aire por el interior del alternador, puede seguirse en el dibujo de perfil cortado de la

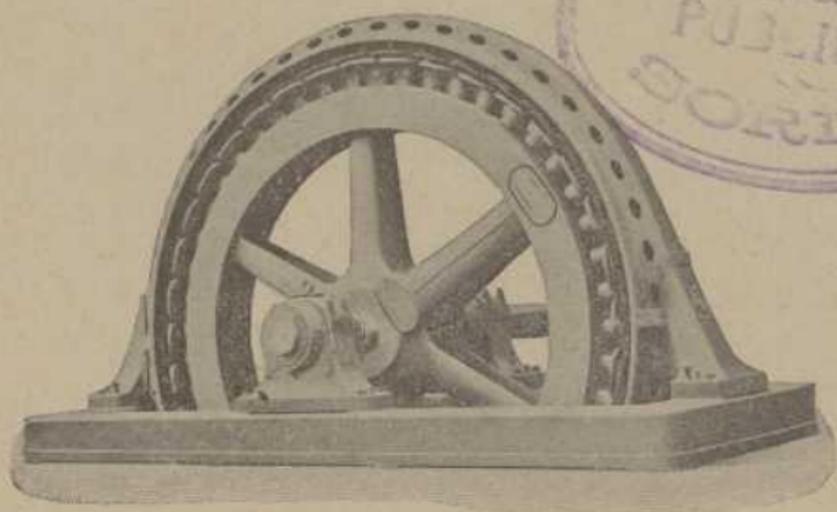


Fig. 31

máquina (fig. 32). El aire exterior y frío m es aspirado por los polos del rotor, que al moverse obran como las paletas de un ventilador, pasa por los entrepolos n y atraviesa los canales de ventilación de la armadura del estátor, refrescando a su paso el devanado inductor, el hierro del estátor y parte del devanado inducido, para escapar al exterior por los agujeros t de la armazón.

El tiro que produce el aire caliente al salir de la armazón origina una depresión a su alrededor que es causa de una corriente de aire r que pasa ro-

zando las conexiones frontales del devanado completando su enfriamiento.

El aire caliente que escapa por los agujeros de la armazón se esparce por la sala de máquinas ele-

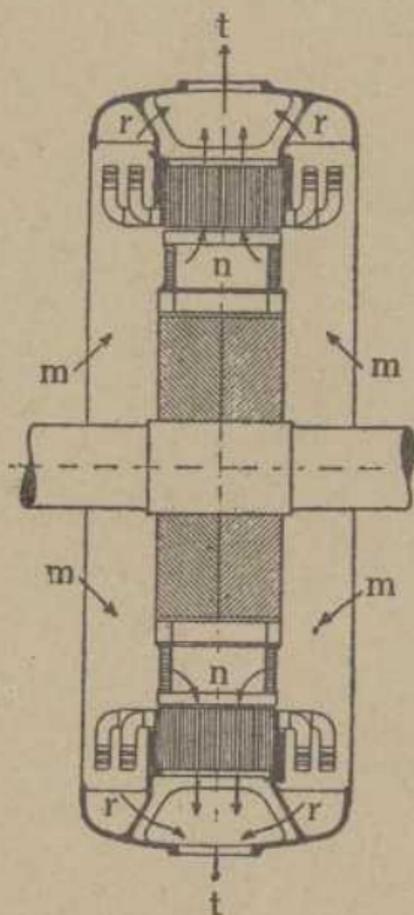


Fig. 32

vando su temperatura, en perjuicio de la refrigeración de las máquinas y obligando a tener la sala en buena ventilación. Defecto que se corrige empleando máquinas semicerradas.

La construcción semicerrada consta de armazón,

sin agujeros de ventilación, provista de unas tapas frontales *m*, *n* (fig. 33) que cubren el estátor y parte del rotor, hasta la base de los núcleos. La culata tiene, entre polo y polo, unas paletas de ventilador

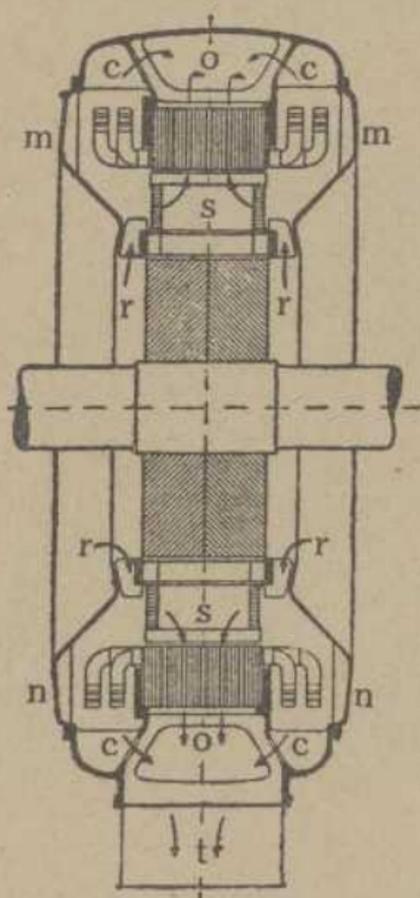


Fig. 33

(fig. 17) que al moverse aspiran por *r* el aire de la sala de máquinas y lo empuja por *s* y *c*, a un colector circular *o* que forma la armazón y que desemboca por *t* a un canal subterráneo en comunicación con el exterior, donde escapa el aire caliente.

La figura 34, es un alternador Siemens Schuckert — Industria Eléctrica, de construcción totalmente cerrada. Las tapas frontales llegan hasta el mismo eje y cierran por completo la armazón, están provistas de unos registros que facilitan la revisión del interior de la máquina en caso de avería y limpieza.

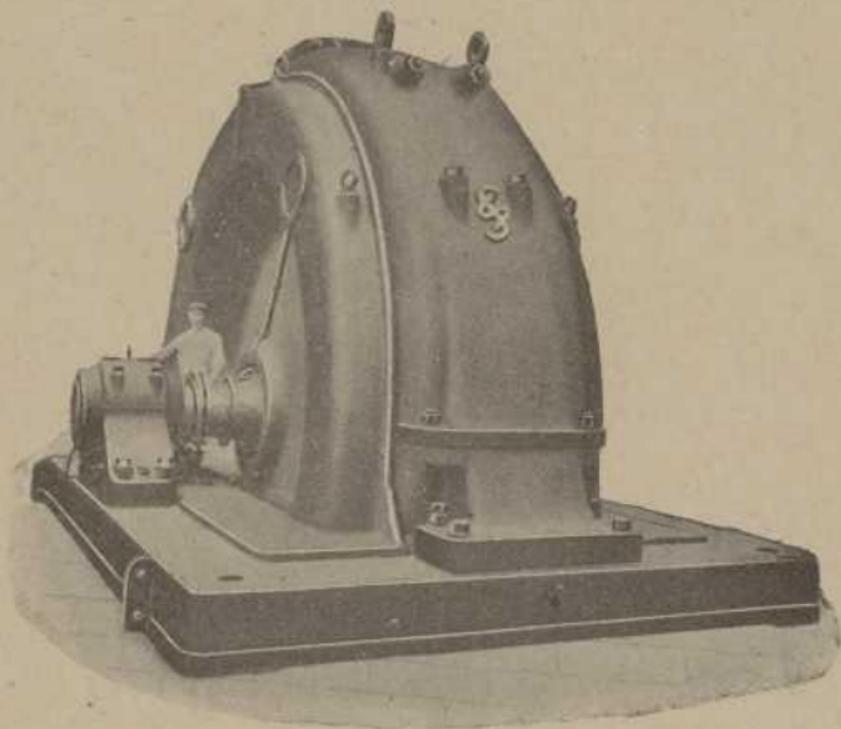


Fig. 34. — Alternador Siemens Schuckert

El aire de refrigeración se toma del exterior de la sala de máquinas por unos canales subterráneos que desembocan en *p* (fig. 35), las paletas *r* aspiran el aire fresco, que recorre los órganos del alternador, tal como en el tipo semicerrado, y escapa por *s* a un canal abierto en el foso de la máquina con salida al exterior.

Tanto en las máquinas cerradas como en las semi-cerradas se amortigua notablemente el ruido producido por el elevado número de revoluciones del rotor, y la salida al aire libre del aire caliente de

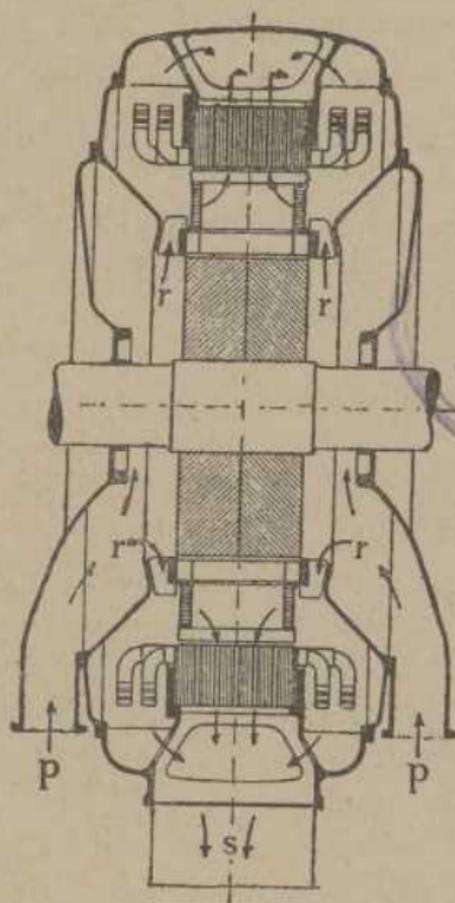


Fig. 55

refrigeración evita el que la sala de máquinas se caliente en exceso.

En el canal de entrada p , de las máquinas de construcción cerrada, es conveniente poner un filtro de aire para evitar la entrada de polvo y

cuerpos extraños, que podrían lastimar la máquina.

Cuando los canales de entrada y salida, por circunstancias especiales de instalación, deben ser tortuosos o de sección deficiente, conviene el empleo de ventiladores especiales para producir un tiro forzado y asegurar la aspiración de aire y la eficacia de la refrigeración.

Un termómetro registrador instalado en el canal de salida, puede dar idea de la marcha y carga del alternador y de cualquier accidente que sufra, lo mismo si es una obstrucción parcial en el circuito de ventilación que si es un corto circuito en los devanados.

Centrado magnético. — Al estudiar los campos magnéticos (tomo I, cap. III) se demostró, con el experimento del espectro magnético, que las líneas de fuerza buscan siempre el camino más corto y de mejor permeabilidad. Esta propiedad general de las líneas magnéticas se deja sentir en los alternadores haciendo que las expansiones polares del inductor cubran por completo la armadura del inducido y que el rotor al moverse esté en perfecto centrado axial con el estátor (figs. 32, 33 y 35).

Si, debido al mal ajuste de los soportes, el rotor no queda centrado con el estátor, al moverse el alternador, las líneas de fuerza, en su afán de acortar el camino del flujo, producen un esfuerzo axial que origina una serie de choques entre el eje y los soportes, o bien una presión sobre éstos: si ocurre lo primero, además del perjuicio mecánico que su-

pone un choque continuo y de la consiguiente pérdida de energía, se produce una trepidación ruidosa en el alternador y marcada oscilación en su voltaje; cuando sucede lo segundo, se produce un desgaste frontal de cojinete y gorrón, con el correspondiente calentamiento exagerado del cojinete. Por todo lo cual es de gran importancia que los alternadores tengan un buen centrado axil.

El centrado axil se facilita dando al rotor un juego en el sentido del eje, que le permita correrse a lo largo de los cojinetes al ser solicitado por el campo.

En caso de un mal centrado, se corrige distintamente según la forma de sujeción de los núcleos polares:

Si los núcleos polares están sujetos por cola de milano, basta quitar las cuñas de fijación y correrlos axialmente en sentido conveniente para conseguir su centrado y luego apretar nuevamente las cuñas de fijación.

Cuando los núcleos son forjados en un solo cuerpo con el cubo de la culata, enroscados en la misma, o sujetos por tornillos radiales, el centrado axil sólo puede conseguirse corriendo el estátor o, más bien, los soportes del rotor.

Además del centrado axil, en los alternadores, debe cuidarse su centrado radial o reparto uniforme del entrehierro. Un entrehierro mal repartido es causa de flujos desiguales en los diferentes campos de un alternador multipolar, tensiones diferentes en las secciones por ellos inducidas, co-

rrientes parásitas en el devanado y un ronquido siempre molesto.

Se reparte el entrehierro de un alternador, levantando o desplazando los soportes del rotor, para hacer que coincidan los ejes de rotor y estátor.

Placa de fundación. — La placa de sostén del alternador (figs. 31 y 34) queda en parte empotrada en la cimentación para evitar todo desplazamiento lateral, y es siempre de grandes dimensiones para que el coeficiente de carga sea muy reducido.

En los grandes generadores, la base de cimentación o fundación es preferible esté separada de los cimientos del edificio, para que las vibraciones del generador no se comuniquen al edificio y a los demás generadores y aparatos. Asimismo, para conseguir este objeto, se recomienda que el suelo de la sala de máquinas no esté unido a las placas de fundación de los generadores, haciendo que quede una rendija entre el contorno de la placa y el marco del suelo.

La placa de fundación lleva la embocadura de los canales de aire frío y caliente, de la ventilación semicerrada y cerrada, y sobre ella descansan la armazón y los soportes provistos de anchas patas para su asiento.

La unión de placa, armazón y soportes se efectúa mediante tornillos, y la posición fija de armazón y soportes se asegura por medio de clavijas cónicas. Gracias a esta disposición es posible desmontar y montar el alternador sin necesidad de nuevos ajustes de sus piezas.

La placa de fundación, además de estar en contacto con tierra, se le da buena comunicación con la línea de tierra de los descargadores y pararrayos, para mayor seguridad contra accidentes fisiológicos.

Alternadores de tipo reducido. — Para potencias comprendidas entre 5 y 125 K. V. A. se construye un tipo de alternador con platos de cojinetes ajustados a la misma armazón del estátor, de construcción más reducida que la del tipo con soportes de cojinetes y placa de fundación, que hemos visto hasta aquí.

Las figuras 36 y 37 representan un modelo que construye la Siemens Schuckert — Industria Eléctrica, como se ve resulta reducido en dimensiones y peso.

La armazón es de una sola pieza fuerte y estética, terminada en dos zapatas de asiento bastante extensas. Está provista de aberturas redondas con rejilla, por donde sale el aire de ventilación aspirado por los frentes. Uno de estos agujeros, el del diámetro horizontal, sirve de asiento a la caja de bornes. Tiene, además, una asa en la parte superior para su traslado.

La armazón sostiene la armadura de chapas del estátor inducido y los platos de cojinete sujetos con tornillos.

El devanado del estátor es de secciones arrolladas sobre molde y descansan en ranuras abiertas sujetas con cuñas de madera. Las conexiones frontales de las secciones inducidas quedan protegidas

contra los desperfectos mecánicos por los platos de cojinete.

La culata del rotor es de chapas y está ajustada al eje con chaveta. Los núcleos polares son de sección rectangular y están sujetos por cola de milano. El número de polos es de 6 u 8, que corresponden

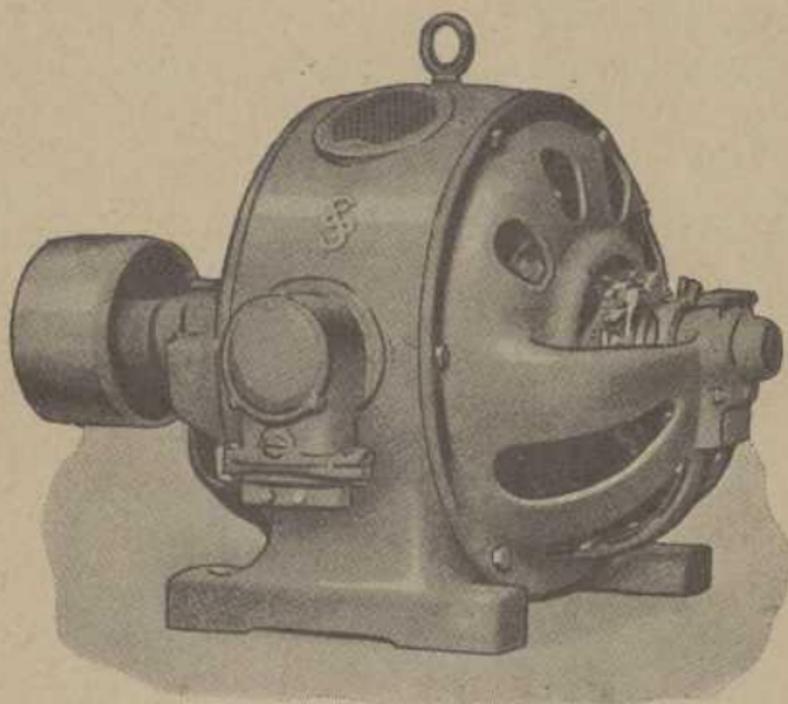


Fig. 36

a la velocidad de 1000 y 750 revoluciones por minuto y 50 períodos.

Un extremo del eje lleva la polea motora y el otro extremo tiene el inducido de continua de la dínamo excitadora. En la figura 37 se ha quitado un plato cojinete para mostrar el inducido de continua. Este mismo plato lleva el inductor de la

dínamo cuya culata forma cuerpo con sus brazos; sus polos en número de cuatro tienen los núcleos de planchas sujetos radialmente con tornillos.

El colector de la dínamo excitadora viene junto al cojintee (fig. 36) en el que se apoya el collar portaescobillas. Como se ve, la forma del plato coji-

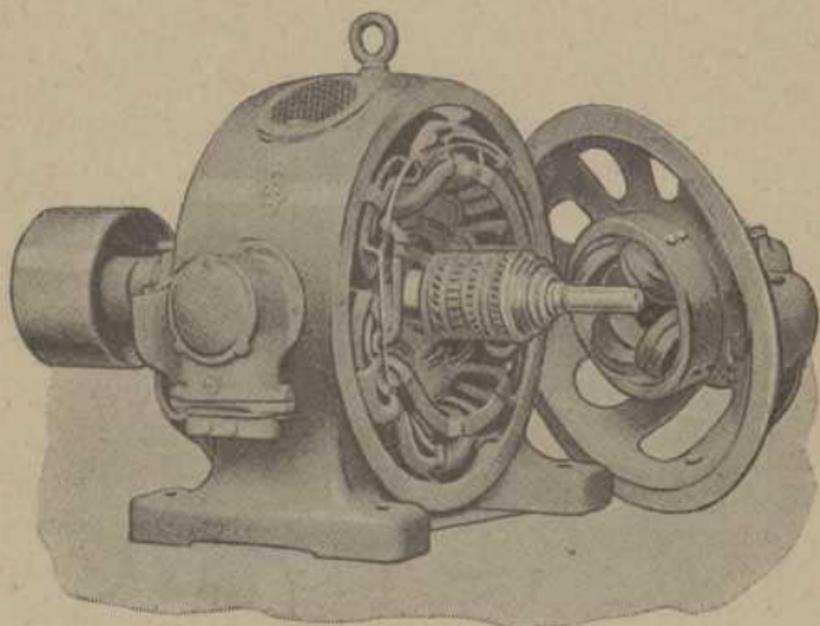


Fig. 37

nete no impide cuidar el colector y las escobillas, que quedan al descubierto.

Al lado opuesto, y junto al otro cojinete está el colector de anillos para la entrada de corriente al inductor.

En este tipo toda la parte eléctrica queda al interior de la máquina, de manera que resultan pro-

tegidos todos los circuitos, además de ocupar poco espacio.

Alternadores de eje vertical. — La conveniencia de acoplar los alternadores directamente a las tur-

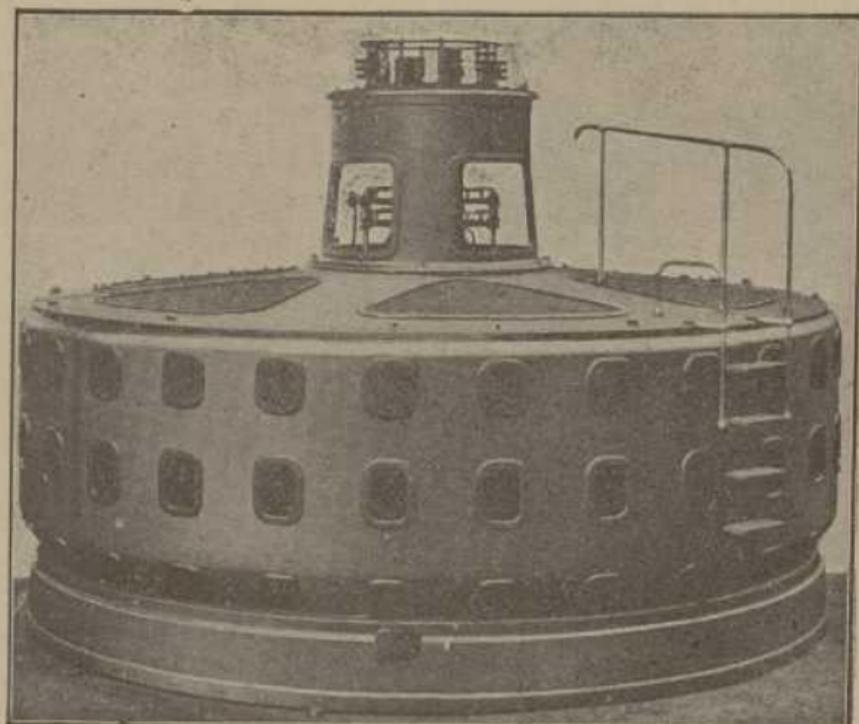


Fig. 38

binas hidráulicas ha hecho crear el tipo de alternador de eje vertical.

Los alternadores de eje vertical tienen la armazón del inducido fijo descansando sobre un marco circular (fig. 38) que hace de placa de fundación, la cual se apoya sobre viguetas medio empotradas en el piso que separa la sala de alternadores de la sala de turbinas.

El inductor móvil lleva dos cojinetes, uno en la parte inferior, que es el de apoyo, y otro en la parte alta, que es el de guía. El cojinete de guía está centrado en un sistema de brazos ajustado sobre la armazón y que sirve de tapa al alternador. El cojinete de apoyo está generalmente sobre la turbina y, a veces, sostenido por un sistema de brazos que parten del marco de fundación.

La circulación de aceite es continua y mantenida por un sistema de bomba compresor que lo mantiene a gran presión con el fin de aliviar la carga del eje. Parte de esta carga es aliviada también por la acción del campo magnético del alternador.

Tanto el cojinete de guía como el de apoyo, se construyen con juego de bolas.

La tapa del alternador, que sostiene el cojinete de guía, sostiene al mismo tiempo una torre que lleva el inductor de la dínamo excitadora y los portaescobillas de los dos colectores, el de delgas y el de anillos.

El inducido de la excitadora va montado en el extremo superior del eje, sobre el cojinete de guía.

El colector de anillos, para la entrada de corriente al inductor del alternador, está entre el cojinete de guía y la dínamo excitadora, mientras el colector de delgas de ésta se encuentra en la parte más alta.

Para la inspección de los colectores y escobillas, tiene la armazón una escalera que da fácil ascenso a la tapa.

CAPÍTULO III

ALTERNADORES DE INDUCIDO E INDUCTOR FIJOS

Su fundamento. — En los alternadores de inducido movable (cap. I) y en los de inductor movable (capítulo II) se produce la fuerza electromotriz senoidal, moviendo el circuito inducido en el seno de un campo magnético, o bien, el campo magnético en el seno del circuito inducido. Dichos movimientos tienen por objeto hacer variar el flujo de las espiras inducidas para tener con la variación de flujo fuerza electromotriz de inducción y, por tanto, corrientes inducidas de forma senoidal o alterna.

La causa original y generadora de fuerza electromotriz es, pues, la variación de flujo y si esta variación se puede conseguir sin mover las espiras inducidas ni el campo inductor, obtendremos fuerza electromotriz de inducción estando en reposo inducido e inductor. Este es el objeto que se persigue en los alternadores de inducido e inductor estáticos.

Según se demostró en el tomo 1, capítulo VIII, el valor del flujo, en un circuito electromagnético, viene dado por la fórmula

$$\mathcal{N} = \frac{4 \pi m i s \mu}{l} = \mathcal{B} s$$

en la cual mi es el número de amperiovueltas del inductor; s y l , la sección y longitud del circuito magnético, y μ el coeficiente de permeabilidad.

De la fórmula del flujo se deduce que podrá variar su valor \mathcal{N} variando la permeabilidad μ del circuito.

La permeabilidad de un circuito depende de los cuerpos que lo forman, según sean aire, más permeables que el aire o menos permeable que él;

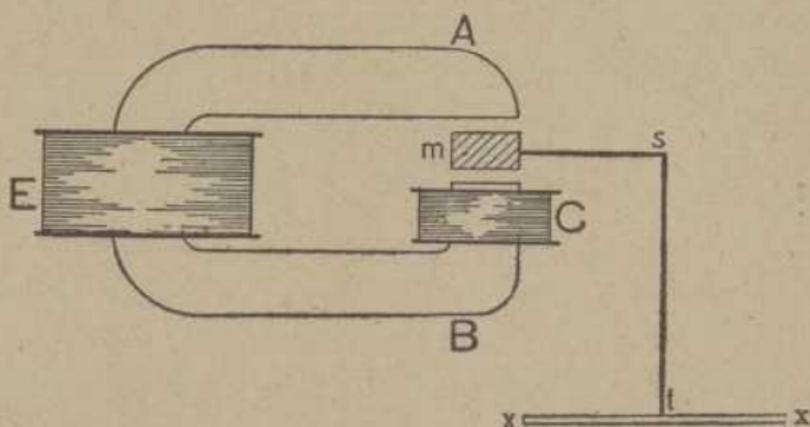


Fig. 39

luego, una manera de variar la permeabilidad consistirá en cambiar los cuerpos que forman el circuito magnético o sólo una parte de ellos.

Estudiemos el modo de conseguir prácticamente esto. Sea E (fig. 39) un electroimán alimentado con corriente continua constante, y AB su núcleo en forma de G; en uno de los polos B , doblado en ángulo recto, supongamos colocado un carrete C y en el entrehierro de los polos una armadura m sostenida por un radio s unido a un eje de giro xx . Mientras la armadura m esté frente los polos A y B ,

el entrehierro del circuito es mínimo, la permeabilidad máxima y lo mismo su flujo; pero, si moviendo el eje xx retiramos la armadura m de entre los polos, aumenta el entrehierro, disminuye la permeabilidad y el flujo se hace mínimo.

El carrete C sometido a esta variación de flujo produce una fuerza electromotriz que es directa, mientras el flujo decrece, y es inversa cuando el flujo crece; obedeciendo en todo a las leyes de Lenz y de Maxwell, estudiadas en el capítulo IX del tomo I.

Durante el paso de la armadura por entre los polos, tendremos: primero, un flujo creciente que nos dará una corriente inducida inversa; en el centro, un flujo máximo y un punto de inflexión en la corriente inducida que ha de cambiar de signo; y finalmente, un flujo decreciente y una corriente inducida de sentido directo, hasta llegar a un flujo mínimo y una corriente nula.

Por lo dicho, la corriente inducida del carrete C tendrá dos alternancias o cambios de signo durante el paso de la armadura por entre polos, o sea, un período completo. La frecuencia de la corriente será igual al número de revoluciones por segundo del eje xx y el alternador resulta bipolar.

Proveyendo el eje xx de varias armaduras m , repartidas en radios equidistantes, se tendrá, en el carrete C , tantos períodos por vuelta como armaduras lleve el rotor, y el alternador resulta multipolar con tantos pares de polos como armaduras móviles.

El carrete E , alimentado por la corriente con-

tinua inductora, es el inductor del alternador, y el carrete *C*, donde nacen las corrientes inducidas, es el inducido. Uno y otro están fijos, sobre los núcleos del alternador que actúan de armazón, y el órgano rótor se reduce a una rueda de hierro que presenta unas expansiones a modo de dientes, como una rueda dentada.

Tipo industrial. — Dejando el inducido con un solo carrete, cabrán en él pocas espiras y pequeña será la fuerza electromotriz inducida (fórmula [3]).

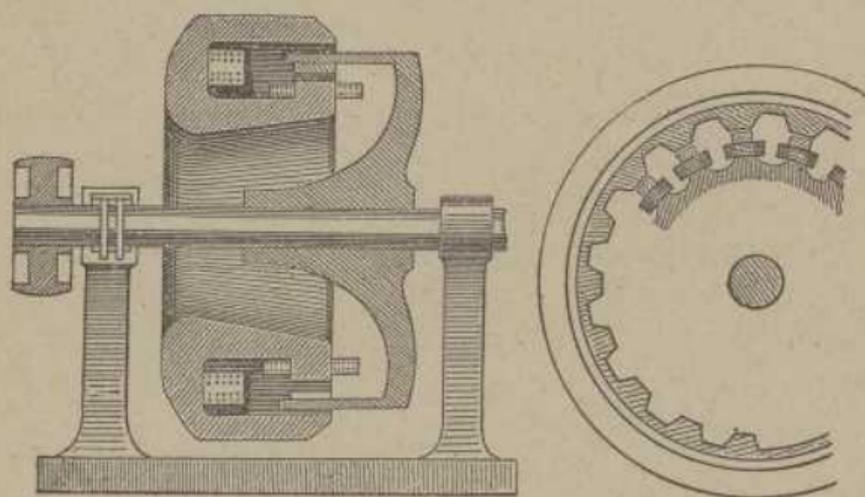


Fig. 40. — Alternador de inducido e inductor fijos

Con el fin de obtener tensiones elevadas, se construye el núcleo en herradura de revolución (fig. 40) de igual eje que el rótor. El carrete inductor único se aloja en el fondo anular del núcleo. El polo interior presenta tantas expansiones como armaduras o dientes tiene el rótor, y en cada expansión se aloja un carrete o sección inducida.

El rotor forma una rueda dentada de dientes interiores, que al moverse produce los máximos y mínimos del flujo.

Siendo el número de dientes del rotor igual al de secciones inducidas, las variaciones de flujo serán concordantes en todas ellas, y también sus corrientes inducidas, de modo que pueden unirse en serie todas las secciones para formar un devanado monofásico de tensión igual a la suma de tensiones de todas las secciones.

Ese tipo de alternador puede llevar, lo mismo que los tipos anteriores, una dínamo excitadora, a un extremo de su eje, para producir la corriente continua de excitación; y el paso de esta corriente al inductor fijo se efectúa, como es natural, sin necesidad de colector de anillos.

Alternador Erlikon. — Esta casa construye un tipo de alternador de inducido e inductor estáticos, que se diferencia notablemente del tipo descrito.

El inducido (fig. 41) es doble, compuesto de dos inducidos como los estudiados en el capítulo anterior para los alternadores de inducido fijo. Los dos inducidos, formados por una armadura de chapas *A* y *B* (fig. 42) y devanado de tambor, están montados sobre una culata común *D*, que en forma de *C* reúne las dos armaduras en un solo circuito magnético.

La culata es de fundición maciza y forma parte del circuito magnético, así como en los alternadores de inductor movable era hueca y sólo servía de armazón protectora.

En el recodo que forma la culata, entre los dos inducidos, está el devanado inductor *C* (fig. 42) formado por un carrete gigante de espiras planas, de cinta de cobre, arrolladas a modo de volante (figura 41) que queda prisionero entre las dos arma-

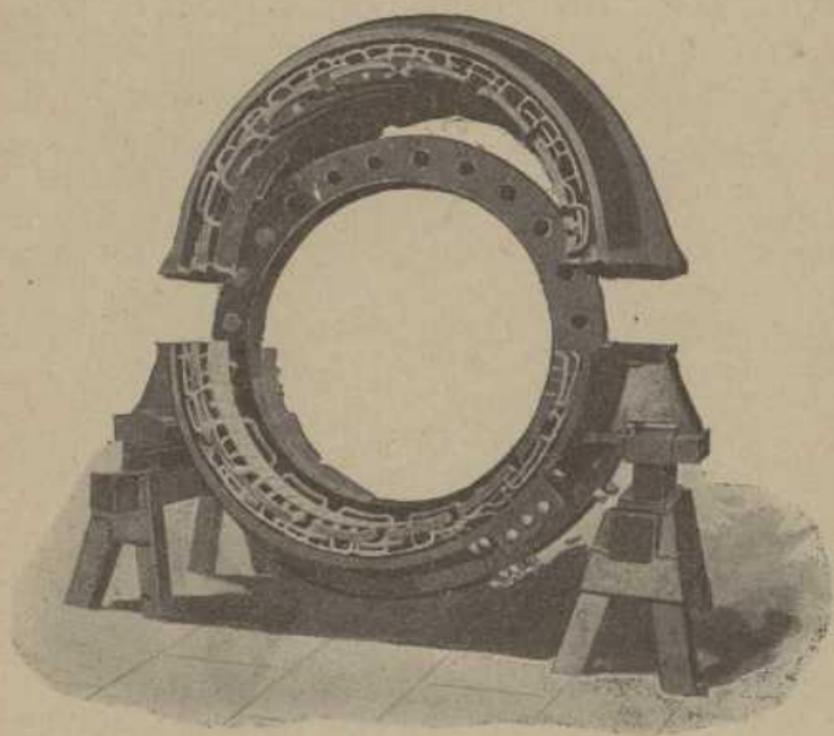


Fig. 41. — Alternador Gërlikon

duras del inducido doble. Culata y armaduras están divididas en dos partes, por su diámetro horizontal, para dar entrada al carrete inductor.

El rotor consta de dos ruedas dentadas reunidas por un volante (fig. 43). Los dientes *E* y *F* (fig. 42) de cada rueda coinciden con las armaduras *A* y *B* del inducido, acortando los entrehierros y completando el circuito magnético.

El flujo producido por el carrete inductor *C*, parte de la culata de fundición *D*, atraviesa la armadura *A*, de la que sale buscando los dientes *E* de una de las ruedas y, pasando por la llanta, sale por los dientes *F* de la otra rueda para entrar en la armadura *B* y volver al punto de partida.

Como es natural, el flujo anular del inductor saldrá con preferencia por las zonas de la armadura

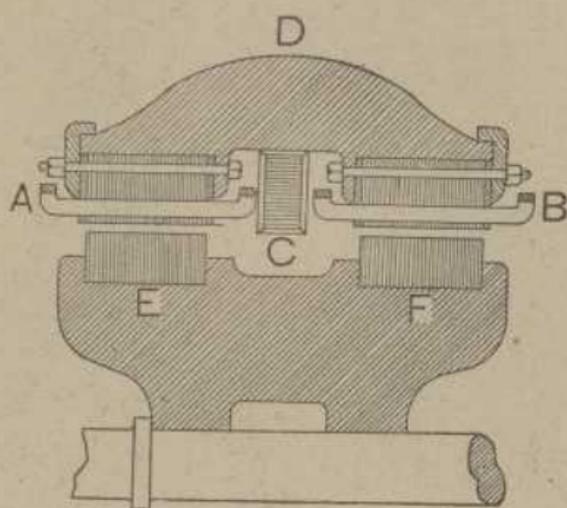


Fig. 42

que estén frente a los dientes; de modo que éstos determinan sobre el inducido zonas de flujo máximo y de flujo mínimo, máximo frente a los dientes y mínimo delante de los huecos. Al moverse la rueda de dientes esos máximos y mínimos del flujo corren por las coronas del inducido y las variaciones de inducción que determinan producen fuerza electromotriz en los devanados de las armaduras.

Todos los dientes de una rueda actúan de polos positivos, mientras los de la otra rueda funcionan

como negativos. La polaridad de cada rueda es constante y el número de pares de polos del alternador es el de dientes de una rueda.

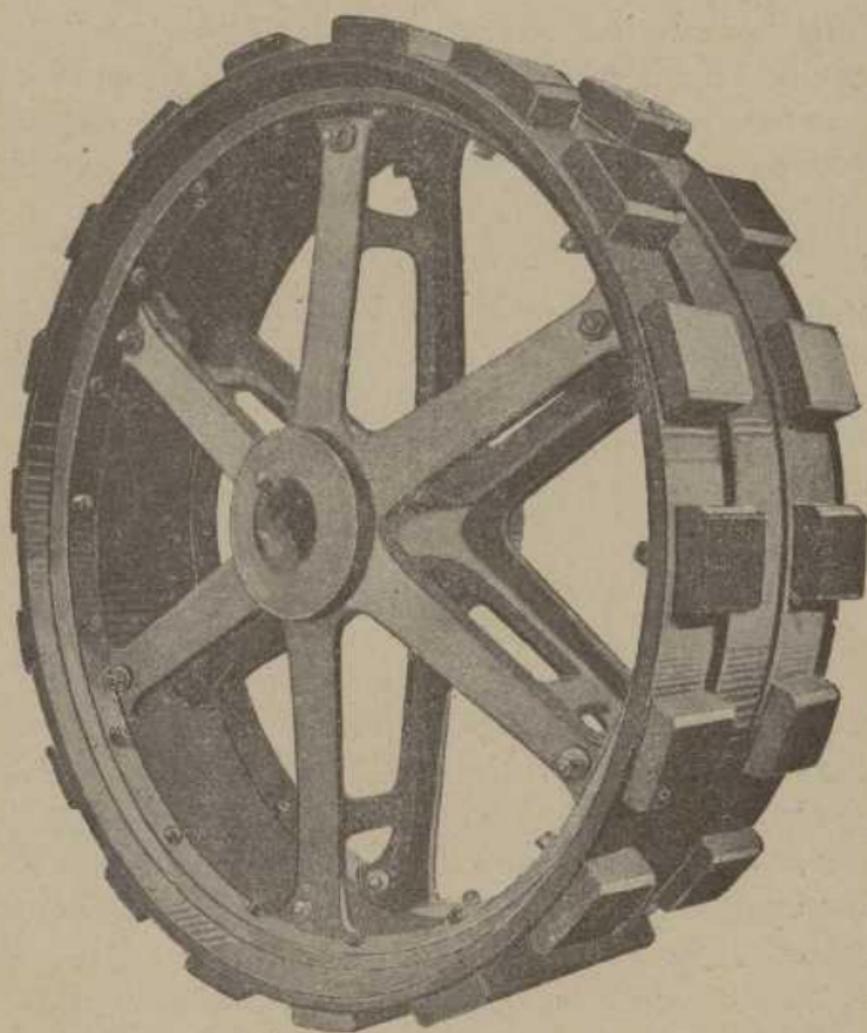


Fig. 43. — Inductor de un alternador de elementos fijos

Como se ve, la constancia de polaridad no es obstáculo para tener una variación de flujo y por ende corrientes inducidas.

Aplicaciones industriales de estos alternadores.—

Tanto en los alternadores de inducido movable como en los de inductor movable, estudiados en los capítulos I y II, las secciones inducidas sufren una inversión de flujo cada vez que el rotor alcanza un paso polar, de modo que están sometidas a la acción de un flujo alterno y la variación que sufren en cada dos pasos polares es desde un máximo positivo a un máximo negativo. No ocurre lo mismo en los alternadores de devanados fijos, que estamos estudiando, puesto que en ellos al avanzar el rotor un paso polar no cambia el signo del flujo y las secciones inducidas sufren una variación de flujo desde un máximo a un mínimo sin cambio de signo; es decir, están sometidas a un flujo ondulado de signo constante.

Como la fuerza electromotriz de inducción es proporcional a la variación de flujo (tomo I, capítulo IX) resulta que, a igualdad de frecuencia, para tener la misma fuerza electromotriz por espira, debe disponerse de igual variación de flujo. No cambiando de signo el flujo de los alternadores de devanados fijos, para obtener en ellos la misma variación y por ende igual fuerza electromotriz que en los alternadores de devanado movable, deben tener un flujo mucho mayor, que sería el doble si fuese cero su mínimo y es mayor del doble no siendo nulo ese mínimo.

Tenemos dicho (pág. 65) que de la importancia del flujo depende la sección del circuito magnético y, por lo tanto, las dimensiones todas de la máquina eléctrica; luego los alternadores de devanados está-

ticos serán siempre más pesados que los de devanado móvil de igual potencia.

La dimensión s del circuito magnético de un alternador de inducido e inductor fijos, se reduce en parte tomando para su circuito una inducción B mucho mayor que las usadas en los alternadores de inducido o de inductor movibles, según demuestra la fórmula citada al principio de este capítulo

$$N = Bs$$

En efecto, a los alternadores de polos alternos no se les puede forzar la inducción, ya que de estar los polos, consecutivos y de signo contrario, muy próximos y saturados, una gran parte de líneas de fuerza se atraerían y pasando de polo a polo, sin atravesar el inducido, aumentarían enormemente el llamado *flujo de dispersión*. Este peligro no puede ocurrir en los alternadores de devanados estáticos, puesto que los dientes de la rueda rotor están imantados de igual signo y, aunque lleguen a la saturación, sus líneas de fuerza se rechazarán haciendo imposible toda dispersión de flujo por el aire; por eso pueden trabajar a una inducción B muy superior a la de los alternadores de devanado móvil.

El principal defecto de los alternadores que estamos estudiando, consiste en que la corriente alterna en ellos inducida difiere mucho de la senoidal que obteníamos en la máquina teórica simple (tomo II, cap. II, fig. 8), resultando una corriente alterna no senoidal de muchos armónicos (tomo II, capítulo II).

Esa imperfección limita el empleo de ese tipo de alternador en la industria, ya que teniendo su corriente armónicos de orden elevado no puede ser empleada en alimentar una red de motores de inducción, ni una línea de transmisión a distancia, sin peligro de tener fenómenos de resonancia (tomo II, cap. III). Sólo se recomienda su empleo en circuitos no inductivos, como por ejemplo, para la alimentación directa de un horno eléctrico.

Una ventaja tiene el alternador de devanados fijos que le hace recomendable como generador en las estaciones trasmisoras de telegrafía sin hilos, y es la de poder dar corrientes alternas de alta frecuencia.

En el tomo XXVIII de esta Biblioteca, se demuestra que la velocidad de propagación de las ondas hercianas está en razón directa con su frecuencia, de ahí la conveniencia de emplear corrientes excitadoras de alta frecuencia.

La fórmula [1]

$$f = p n : 60$$

nos dice que la frecuencia de una corriente depende del producto de p pares de polos del alternador por el de revoluciones n . En el alternador de inducido e inductor fijos, el número de pares de polos es igual, según tenemos dicho, al de dientes del rotor; y siendo fácil construir un rotor con muchos dientes será posible disponer de un alternador de muchos pares de polos. El otro factor que interviene en la frecuencia, o sea, la velocidad n , puede for-

zarse mucho en los alternadores de ese tipo, puesto que el rotor resulta ligero y de construcción sólida y en él no deben temerse los esfuerzos debidos a la fuerza centrífuga.

Pudiendo tener los alternadores de devanados estáticos, muchos polos y gran velocidad, están indicadísimos como generadores de alta frecuencia.



CAPÍTULO IV

ALTERNADORES POLIFÁSICOS

Su ventaja. — Siendo las espiras del inducido fuentes de corriente, la potencia producible por un alternador, de flujo y frecuencia constantes, crecerá con el número de espiras de su inducido.

Si todas las espiras del inducido han de formar una sola fase, las fuerzas electromotrices de todas ellas deben ser concordantes; lo cual requiere que las espiras todas corten el flujo según ángulos iguales (pág. 6). Esto obliga a colocar las espiras en sitios simétricos de cada campo, limitando su situación y, por lo tanto, su número, en los inducidos monofásicos.

El número de espiras de un inducido podrá ser máximo cuando estén colocadas por toda la superficie activa del inducido, sin limitación de sitio. Tales espiras, uniformemente repartidas por el perímetro de la armadura, cortarán el flujo según ángulos diferentes y equirrepartidos entre 360° dentro de un campo magnético, repitiéndose los mismos ángulos en todos los campos de un alternador multipolar. Reuniendo por separado las espiras de

igual ángulo o fase de todos los campos, se forma un devanado de varios grupos o fases que resulta un inducido polifásico.

En resumen; un inducido monofásico tiene un solo devanado o fase formada por la unión de las secciones, cortas o largas, de todos los campos, siempre en número limitado de espiras, y el inducido polifásico es la superposición de varios devanados monofásicos equidistantes, cuyo número de espiras se va multiplicando por el número de fases.

Los alternadores polifásicos más usados son:

El difásico, o de dos fases

y *el trifásico*, o de tres fases.

Cada fase de un alternador polifásico produce una potencia, dada por la fórmula [8]

$$W = v i \cos \varphi$$

y las q fases *independientes* dan una potencia total

$$W = q v i \cos \varphi \quad [10]$$

Por lo que se ve, un alternador polifásico puede dar una potencia q veces mayor que la de un monofásico de igual dimensión, lo que constituye notable ventaja del polifásico sobre el monofásico.

Esta ventaja unida a la facilidad de poder producir campos giratorios con corrientes polifásicas (tomo II, cap. V), a propósito para transformar la energía eléctrica en mecánica con los sencillos motores de inducción (tomo VII), hacen que los alternadores polifásicos sean preferidos en toda instala-

ción, constituyendo casi la totalidad de los alternadores en funcionamiento.

Además, por si todo lo apuntado no fuese suficientemente favorable para el alternador polifásico, cuando estudiemos las líneas para corriente alterna (tomo XIII, cap. III) se verá que adoptando el sistema difásico se consigue una economía de cobre en la línea, economía que es todavía mayor en el sistema trifásico.

Bajo todos conceptos es, pues, ventajoso el empleo de alternadores polifásicos.

Inducidos. — Ya al estudiar el alternador de inductor movable (cap. II) señalábamos como una de las propiedades del inducido fijo, su abundancia de sitio que permitía hacer un devanado polifásico; así, pues, los alternadores polifásicos son, en general, del tipo de inductor movable e inducido estático. Este no presenta otra variante, sobre el inducido monofásico estudiado en el capítulo II, que el número de ranuras y la forma de devanado.

Inducido difásico. — El devanado difásico, en general, se hace con tantas secciones por fase como polos. Su número b es:

$$b = 2 \times 2 \phi = 4 \phi$$

Cada fase de secciones diseminadas debe tener (fórmula [9])

$$2 \times 2 \phi u \text{ ranuras}$$

y las dos fases, en total, necesitan

$$2 \times 2 \times 2 \phi u = 8 \phi u \text{ ranuras}$$

siendo u el número de madejas por sección.

En devanados concentrados ($u = 1$) el número de ranuras se reduce a

$$8 \phi$$

y devanando en dos capas (pág. 19) a

$$4 \phi = b$$

o sea, una ranura por sección, como debía resultar (página 17).

La figura 44 representa en esquema un devanado difásico de secciones concentradas, con 8 ranuras

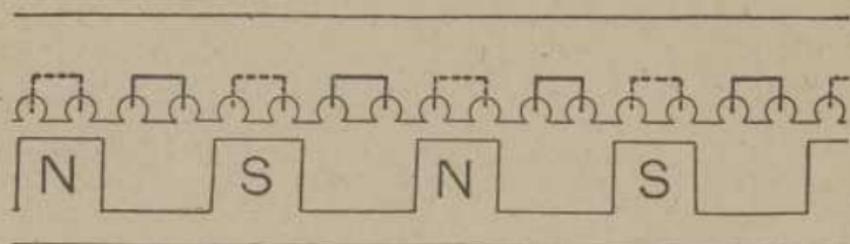


Fig. 44

por cada dos polos. Las secciones de una fase (línea de trazos) caen frente los polos N y S , mientras las secciones de la otra fase (línea seguida) cubren las otras ranuras. El paso polar (4 ranuras) se ha dividido en dos partes iguales para colocar una sección de cada fase dentro del paso polar.

A cada paso polar le corresponde una alternancia,

o medio período, y estando las secciones de una y otra fase separadas medio paso polar (dos ranuras) la separación de fases o desfase será la mitad de medio período, o sea, un cuarto de período. Por lo tanto, el alternador difásico de secciones cortas dará siempre corrientes desfasadas 90° o un ángulo recto.

La forma de devanado de la figura 44, es la llamada de *fases separadas*, por estar, como su nombre indica, completamente separadas una y otra fase.

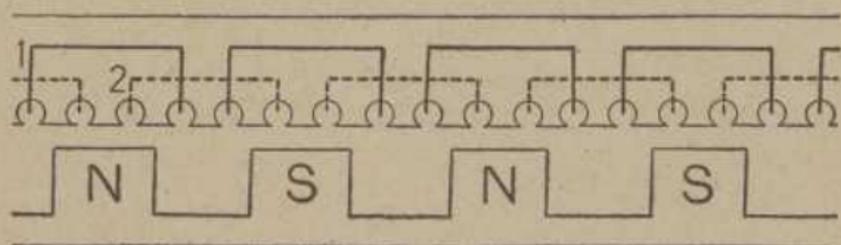


Fig. 45

El mismo devanado, con igual número de secciones y ranuras, puede hacerse dándole la forma esquematizada de la figura 45. En ella, las ramas de las secciones de una fase (línea continua) caen dentro del sitio abarcado por una sección de la otra fase (línea de trazos) y viceversa, resultando lo que se llama un devanado de fases superpuestas.

La separación entre la rama 1 y la 2, de las secciones de dos fases, continua siendo de medio paso polar (dos ranuras) y por lo tanto el desfase de las corrientes resulta de 90° .

En todo devanado de fases superpuestas llamaremos *amplitud de sección* al número de ranuras

internas de toda sección; este número es 2, en el devanado de la figura 45, y si las secciones fuesen diseminadas sería $2u$.

El devanado de fases superpuestas en inducidos difásicos tiene la ventaja, sobre el de fases separadas, de permitir devanar en dos capas, ya que las ramas de una fase (línea continua o línea de trazos) caen en dos ranuras contiguas (fig. 45) y pueden, por lo tanto, alojarse a una sola ranura, reduciendo el número de éstas a la mitad.

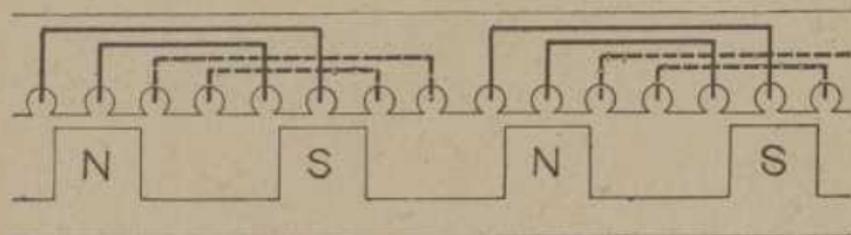


Fig. 46

Las secciones de una misma fase se unen consecutivamente cruzando sus conexiones, *final con final y principio con principio*, para que resulten *arrolladas en sentido contrario* (pág. 15).

Si conviene un devanado de secciones largas, puede hacerse adoptando la forma esquemática de la figura 46. Tiene, como los ejemplos anteriores, ocho ranuras por cada dos polos y el número de secciones por fase es igual al de pares de polos, como corresponde a todo devanado de secciones largas. El devanado es de fases superpuestas y secciones diseminadas ($u =$ dos madejas), siendo la amplitud de sección $2u = 2$ ranuras.

La separación de fases es de un cuarto de período (2 ranuras) y la conexión entre las secciones de una misma fase debe ser directa, para que resulten *arrolladas en el mismo sentido*, cual corresponde a un devanado de secciones largas (pág. 15).

El devanado difásico de secciones largas es muy poco empleado, estando muy generalizado el de secciones cortas.

Las dos fases pueden comunicar sus extremos separadamente a cuatro bornes, para funcionar independientemente como si fuesen dos alternadores monofásicos. En tal caso la red distribuidora debe tener cuatro conductores iguales, dos por fase, y en ella no se obtiene economía de cobre sobre el sistema monofásico (tomo XIII, cap. III).

El número de conductores se reduce a tres, reuniendo dos extremos, uno de cada fase, a un borne común y llevando los otros dos extremos a dos bornes independientes. Así el número de bornes del alternador difásico se reduce a tres, dos de entrada a las dos fases y uno de salida común a las dos.

Los conductores de la red distribuidora que comunican con los dos bornes de entrada, llevan la corriente simple de cada fase, mientras el conductor del borne común recoge las corrientes de las dos fases, cuya suma vamos a determinar.

Sean $AB = i'$ y $AC = i''$ (fig. 47) las corrientes de las dos fases desfasadas un ángulo recto; la resultante de las dos será: $BC = I$, hipotenusa del triángulo rectángulo ABC , que según la

conocida relación pitagórica (tomo II, pág. 13) vale

$$BC = \sqrt{AB^2 + AC^2} \quad \text{ó} \quad I = \sqrt{i'^2 + i''^2}$$

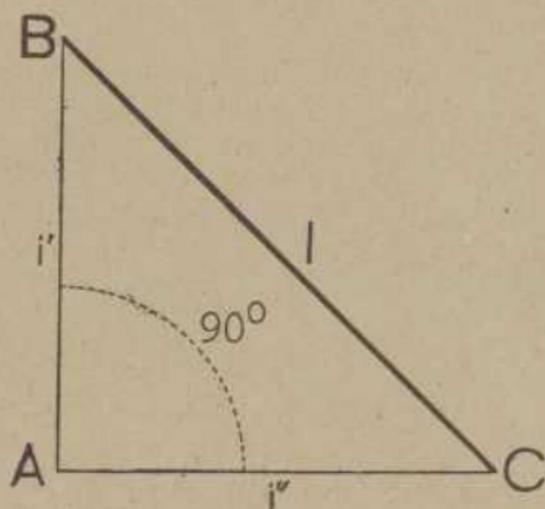


Fig. 47

Cuando las dos fases están igualmente cargadas ($i' = i'' = i$) la corriente resultante en el conductor común es:

$$I = \sqrt{2} i^2 = 1.41 i \quad [11]$$

Llevando el conductor común mayor corriente que los conductores de fase, su sección debe ser proporcionalmente mayor. La distribución difásica por tres hilos se caracteriza, pues, en que uno de los hilos, el del centro, es más grueso.

La potencia W de las dos fases, el factor de potencia $\cos \varphi$, y la tensión v y corriente i por fase, están relacionados por la fórmula [10]

$$W = 2 v i \cos \varphi$$

EJEMPLOS. — 1.º *Un alternador difásico de 120 voltios, alimenta un circuito de $\cos \varphi = 0'9$ y corriente 28 amperios. ¿Qué potencia suministra?*

Aplicando valores a la fórmula anterior, resulta:

$$W = 2 \cdot 120 \cdot 28 \cdot 0'9 = 6048 \text{ vatios}$$

2.º *Un alternador difásico de 120 voltios, marcha con una carga de 6,800 vatios y 32 amperios. ¿Qué factor de potencia tiene el circuito?*

Despejando $\cos \varphi$ de la fórmula de la potencia, se tiene:

$$\cos \varphi = \frac{W}{2 v i}$$

y aplicando valores, resulta:

$$\cos \varphi = \frac{6800}{2 \cdot 120 \cdot 32} = 0'885$$

3.º *Un alternador difásico de 140 voltios, alimenta un circuito de $\cos \varphi = 0'88$ y carga 7700 vatios. ¿Cuál es la corriente simple en los conductores de fase y cuál es en el conductor común?*

Despejemos la corriente simple i , de la fórmula de la potencia

$$i = \frac{W}{2 v \cos \varphi}$$

y aplicando valores tendremos:

$$i = \frac{7700}{2 \cdot 140 \cdot 0'88} = 31'25 \text{ amperios}$$

La corriente compuesta, en el conductor común a las dos fases, la buscaremos por la fórmula [11]

$$I = 1'41 i = 1'41 \cdot 31'25 = 44'06 \text{ amperios}$$

Inducido trifásico. — El tipo general de devanado trifásico es el de secciones largas, o de tantas secciones por fase como pares de polos, su número b es, pues:

$$b = 3 \phi$$

Cada sección diseminada, formada de u madejas, necesita $2u$ ranuras y el total de ranuras ocupadas por las b secciones debe ser:

$$3 \phi \times 2 u = 6 \phi u \text{ ranuras}$$

que en devanados concentrados ($u = 1$) se reducen a

$$6 \phi \text{ ranuras}$$

El intervalo correspondiente a un doble paso polar (6 ó $6u$ ranuras, según sean las secciones concentradas o diseminadas) se divide en tres partes para destinar una a cada fase, que así resultan siempre separadas un tercio de período, o sea, 120° .

Cada sección puede alojarse en $6u : 3$ ranuras consecutivas, para formar un devanado de fases separadas; o en $6u : 3$ ranuras partidas en dos grupos separados por $2u$ ranuras, que han de servir de asiento a las u ramas de las dos secciones contiguas, para formar un devanado de fases superpuestas.

La figura 48, representa un devanado trifásico de secciones concentradas y fases superpuestas. El número de ranuras por cada par de polos es 6 y

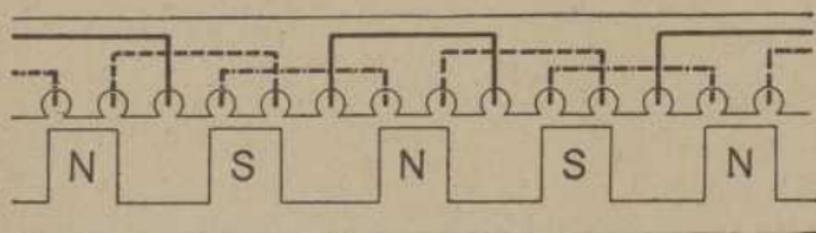


Fig. 48

la separación de fases (línea de trazos, línea de trazos y puntos y línea continua) es de dos ranuras, que representan un tercio de período.

La figura 49, es un devanado trifásico de fases superpuestas y secciones diseminadas, formadas

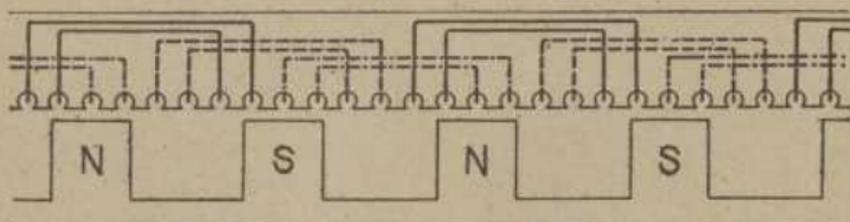


Fig. 49

por $u = 2$ madejas; el número de ranuras por cada par de polos es:

$$6u = 12$$

y corresponden cuatro a cada tercio de período.

Las dos madejas de cada sección se alojan en

$$6u : 3 = 4 \text{ ranuras}$$

separadas en dos grupos distanciados por $2u = 4$ ranuras que sirven de caja a las ramas de las dos secciones contiguas.

La separación de fases (línea continua, de trazos y de trazo y punto) es de 4 ranuras, o sea un tercio de período.

La unión de las secciones de cada fase debe ser directa, *fin con principio*, para que resulten *arrolladas en el mismo sentido*, cual corresponde a un devanado de secciones largas.

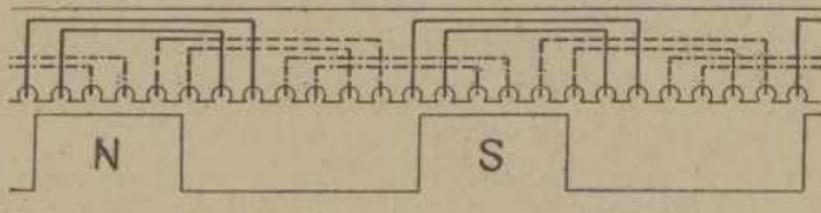


Fig. 50

No hay inconveniente en hacer un devanado trifásico de secciones cortas; pero en él debe tenerse en cuenta que el número de secciones y de ranuras es doble

$$b = 3 \times 2 p \text{ secciones } \text{ y } 2 \times 6 p u \text{ ranuras}$$

La figura 50, es el esquema de un devanado trifásico de secciones cortas y fases superpuestas. cada sección consta de $u = 2$ madejas y cada par de polos abarca

$$2 \times 6 u = 24 \text{ ranuras}$$

Cada doble paso polar se ha dividido en seis partes y cada sección se aloja en una de esas partes

$$24 : 6 = 4 \text{ ranuras}$$

Para hacer el devanado de fases superpuestas, se ha dado a cada sección una amplitud de $2u = 4$ ranuras, que son ocupadas por las ramas de las secciones contiguas.

La separación de fases (línea de trazo y punto, continua y de trazos) es de 4 ranuras, que corresponden a un sexto de período ó 60° . El sistema de corrientes obtenido por ese alternador es incompleto o trifásico de 60° (tomo II, capítulo IV) que según se demostró, para convertirlo en trifásico completo o de 120° será preciso invertir la fase intermedia.

La unión de las secciones de cada fase debe ser cruzada, como corresponde a secciones cortas (página 15).

El tipo de devanado de secciones cortas se emplea muy poco en los alternadores trifásicos, sólo en el caso de alternadores bipolares tiene alguna aceptación, en general es preferido el devanado de secciones largas, que da el sistema trifásico de 120° sin necesidad de inversiones.

Conexión de fases. — Los seis extremos de las tres fases pueden llevarse a seis bornes, para hacer funcionar el alternador trifásico como si se tratara de tres monofásicos independientes; o puede reducirse el número de bornes a tres, conectando interiormente las tres fases en *estrella* o en *triángulo*.

El sistema de fases conectadas es el que se adopta en todos los alternadores, porque al reducir los bornes a tres se reducen al mismo número los conductores de la red distribuidora, consiguiendo notable economía de cobre.

La conexión *triángulo* se forma reuniendo los extremos de las fases dos a dos (fig. 51) para que resulten los tres bornes *a*, *b* y *c*.

En esta conexión resultan reunidas en cantidad o paralelo las dos fases que concurren a cada borne

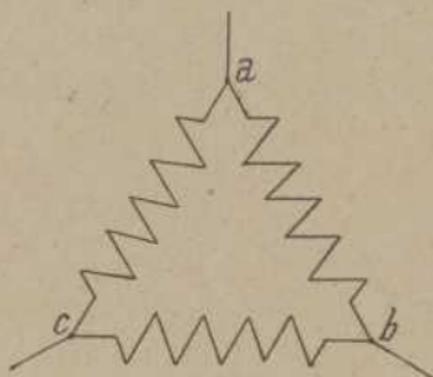


Fig. 51

y el conductor por él alimentado recibirá la suma de las corrientes, no concordantes, de las dos fases.

Si las corrientes fuesen concordantes, su suma sería aritmética y siendo los sumandos *a b*, *a c* y *c b* iguales, valdría el doble que uno de ellos; pero estando las corrientes desfasadas 120° , debe buscarse la resultante de cada dos por la composición gráfica de la figura 25, tomo II.

Convengamos en representar por *I* la corriente resultante y por *i* la corriente de cada fase; la ci-

tada composición gráfica nos dará la expresión trigonométrica

$$I = 2 i \operatorname{sen} \frac{\pi}{q} = 2 i \operatorname{sen} 60^\circ$$

teniendo en cuenta que π (media circunferencia de radio 1) vale 180° y que q (número de fases) en el sistema trifásico vale 3.

Buscando el valor del seno de 60° , en la tabla del tomo II, capítulo I, y substituyendo valores, resulta:

$$I = 2 i \times 0'866 = 1'732 i \quad [12]$$

de donde

$$i = I : 1'732$$

Las tensiones externas, entre a y b , a y c y c y b , deben ser iguales a la tensión por fase, toda vez que el montaje en paralelo no altera la tensión; de modo que si convenimos en representar la tensión de una fase por v , y la tensión entre conductores por V , en el montaje triángulo podemos establecer la igualdad

$$v = V$$

La fórmula de la potencia [10], referida al alternador trifásico, es:

$$W = 3 v i \cos \varphi$$

y puesta en función de la corriente y tensión externa

$$i = I : 1'732 \quad \text{y} \quad v = V$$

resulta, para un alternador trifásico conectado en triángulo,

$$W = 3 V \frac{I}{1.732} \cos \varphi = 1.732 V I \cos \varphi \quad [13]$$

La conexión estrella consiste en reunir las tres fases a un punto N (fig. 52) llamado punto neutro, y llevar los extremos libres A , B y C de las tres fases a los tres bornes del inducido.

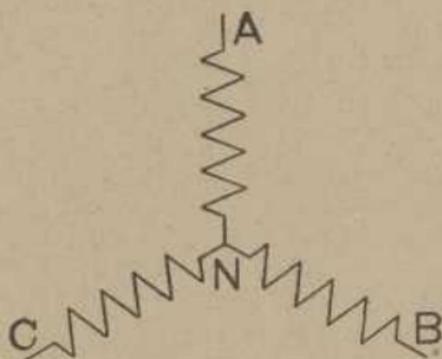


Fig. 52

En la conexión estrella, resultan las fases reunidas en series de dos $A N B$, $A N C$ y $B N C$. La corriente será constante a lo largo de cada serie e igual a la corriente de los conductores exteriores; luego, en el montaje estrella, podemos establecer la igualdad

$$i = I$$

Las tensiones de las fases se sumarán, por estar unidas en serie, y entre los conductores $A B$, $A C$ y $B C$, tendremos la resultante de dos tensiones

desfasadas 120° , que, como la resultante de las corrientes en el sistema triángulo, su composición gráfica da

$$V = 1.732 v \quad \text{ó} \quad v = V : 1.732 \quad [14]$$

La potencia total del alternador conectado en estrella, puesta en función de la tensión e intensidad exterior, resulta:

$$W = 3 \frac{V}{1.732} I \cos \varphi = 1.732 V I \cos \varphi \quad [15]$$

que es la misma obtenida en el montaje triángulo. Como se ve, la conexión de las fases no influye en la potencia del alternador y sí en la corriente y en la tensión.

En resumen, podemos establecer los siguientes principios:

La potencia de un alternador es independiente de la conexión de sus fases.

La conexión triángulo equivale a la conexión en paralelo, aumenta la corriente conservando la misma tensión.

La conexión estrella es equivalente a la conexión serie, aumenta la tensión conservando la misma corriente.

EJEMPLO. — *Un alternador trifásico de 12000 vatios y 150 voltios de tensión simple. ¿Qué corrientes podría suministrar en estrella y en triángulo, funcionando con $\cos \varphi = 0.9$?*

Conectado en estrella dará una tensión (fórmula [14])

$$V = 1.732 \times 150 = 260 \text{ voltios}$$

La intensidad, deducida de la fórmula [13], es:

$$I = \frac{W}{1.73 V \cos \varphi}$$

y dando valores numéricos, resulta:

$$I = \frac{12000}{1.732 \cdot 260 \cdot 0.9} = 29.7 \text{ amperios}$$

En triángulo, la corriente pasaría a ser (fórmula [12])

$$I = 1.732 \times 29.7 = 51.4 \text{ amperios}$$

que también se puede deducir de la fórmula [13], supuesta la tensión en triángulo de 150 voltios,

$$I = \frac{12000}{1.732 \cdot 150 \cdot 0.9} = 51.4 \text{ amperios}$$

Empleo de hilo neutro. — El montaje de las fases en estrella permite el empleo de cuatro conductores en la distribución, los tres unidos a las fases *A*, *B* y *C*, y un cuarto unido al centro de estrella *N*. Este último constituye el *hilo neutro* de la red y facilita la instalación de receptores monofásicos de tensión *v*, que deben ser alimentados por una sola fase.

Cuando un alternador trifásico debe alimentar receptores monofásicos, se derivan éstos repartiéndolos todos entre las tres fases y dándoles como hilo de vuelta común el conductor neutro. Si el

reparto se ha hecho bien, el conductor neutro resulta sin carga, y sólo cuando las fases están desigualmente cargadas pasa por el hilo neutro la diferencia de cargas.

Designación de bornes. — La Asociación de electricistas alemanes (A. E. A.) tiene adoptado un conjunto de signos convencionales para designar los bornes de los alternadores, signos que son empleados por las más importantes casas constructoras y que detallamos a continuación por ser los más generalizados.

Los seis bornes de un alternador trifásico se representan..... con U, V, W, X, Y, Z siendo los orígenes de las fases U, V, W y los finales..... X, Y, Z correspondiéndose en orden alfabético a cada fase abierta $U-X, V-Y, W-Z$

Las tres fases se unen en estrella.... por X, Y, Z y en triángulo por $U-Y, V-Z, W-X$ quedando como bornes principales..... U, V, W

Los alternadores difásicos se designan en fases abiertas..... con $U-X, Y-V$ en conexión compuesta recibe el punto de unión el signo..... X, Y

Los inducidos monofásicos se designan.. con $U-V$

El hilo neutro se designa..... con O

El devanado inductor (fig. 13)..... con $J-K$

El regulador de campo (fig. 13)..... con $s-t$ siendo s , contacto de palanca corredera, el que debe unirse con J o con K .

El contacto interruptor se señala..... con q

- La red de corriente trifásica de tres conductores con R, S, T
 La red de corriente trifásica con cuatro conductores (hilo neutro)..... con O, R, S, T
 La red difásica..... con $Q-S, R-T$
 La red monofásica de dos conductores.. con $R-T$
 La red monofásica de tres conductores.. con $R-O-T$

Inductores. — Los inductores de alternadores polifásicos son idénticos a los de los alternadores monofásicos, sin variación alguna, ya que su objeto es producir un campo magnético de iguales condiciones, en uno y otro tipo de alternador.

Consideramos suficientemente detallados los tipos y construcción de inductores, en los capítulos I y II, por lo tanto, huelga insistir sobre ellos.

Relación entre polos, fases, secciones inducidas y revoluciones. — Como guía práctica, damos a continuación una tabla de polos, secciones de revoluciones de los alternadores monofásicos, difásicos y trifásicos; entendiendo que los alternadores monofásicos y difásicos los suponemos devanados en secciones cortas y los trifásicos, en secciones largas, además, las revoluciones por minuto corresponden a la frecuencia de 50 períodos.

Número de polos	SECCIONES			Revoluciones por minuto
	I fase	II fases	III fases	
2	2	4	3	3000
4	4	8	6	1500
6	6	12	9	1000
8	8	16	12	750
10	10	20	15	600
12	12	24	18	500
16	16	32	24	375
20	20	40	30	300
24	24	48	36	250
30	30	60	45	200
40	40	80	60	150
48	48	96	72	125
50	50	100	75	120
60	60	120	90	100



CAPÍTULO V

TURBOALTERNADORES

Turbina de vapor. — Sus ventajas. — Las principales ventajas de la turbina de vapor, sobre la máquina de pistón, son las siguientes:

Todos los órganos movibles de la turbina tienen movimiento circular; gracias a ello, la turbina puede tener un par motor constante durante toda una revolución, sin necesidad de volante regulador, cuyo empleo se evita.

Suprimido el volante, la acción del regulador resulta mucho más rápida.

El rendimiento de la turbina es superior al de la máquina de émbolo, pues al suprimir éste, se suprimen sus rozamientos y choques, que suponen siempre gran pérdida de energía. Además, sin el empleo de émbolo se economiza el gasto de aceite de su lubricación, gasto que se evalúa en 2 gramos por caballo-hora; por otra parte, este aceite se mezclaba con el vapor y dificultaba el empleo de éste como alimentador después de la condensación. En la turbina el vapor de condensación sale limpio de aceite y en buenas condiciones para alimentar la caldera.

Los órganos rozantes se reducen a dos o tres soportes, con lo cual la lubricación y vigilancia de la turbina son insignificantes.

Gran economía en la instalación, debido a sus reducidas dimensiones y a la falta de trepidación.

Todas esas ventajas hacen de la turbina de vapor el motor térmico preferido para el accionamiento directo de alternadores y han contribuido a generalizar cada vez más el uso de los turboalternadores en las centrales eléctricas; entendiéndose por *turboalternador* todo grupo formado por una turbina de vapor y un alternador, directamente acoplados.

Su velocidad y potencia. — El vapor recalentado a 250° y 10 atmósferas de presión, adquiere una velocidad de 1200 m. por segundo. Actuando este vapor libremente sobre las paletas de la turbina le comunica una velocidad periférica análoga, que, por grande que sea el diámetro de la turbina, determina una velocidad angular elevada. Aunque se ha logrado reducir esta velocidad empleando turbinas compuestas, provistas de artificios estudiados para utilizar repetidas veces el mismo vapor y hacerle perder velocidad, no es posible fabricar una turbina de marcha lenta, sin complicar enormemente su construcción.

La marcha normal de todos los tipos de turbinas de vapor en explotación, oscila entre 3000 y 1000 revoluciones por minuto.

Si la turbina para evitar pérdidas de transmisión ha de accionar directamente el alternador, el

número de polos de éste, deducidos de la fórmula [1]

$$f = p n : 60$$

para las velocidades citadas y la frecuencia de 50 períodos, queda comprendido entre dos y seis. Hasta 400 HP, suelen construirse turboalternadores de inductor bipolar con 3000 revoluciones, entre 400 y 600 HP, se construyen inductores de cuatro polos con 1500 revoluciones, y para potencias superiores se adoptan inductores de seis polos con 1000 revoluciones.

El consumo de vapor por caballo-hora, en las turbinas, decrece notablemente al aumentar la potencia de la turbina. En efecto, si representamos por N el número de caballos efectivos de una turbina, y por p el peso en kilos de vapor consumido por caballo-hora, este consumo viene dado por la fórmula

$$p = 6'33 + \frac{90}{N}$$

Dando a N los valores 9 y 900, el gasto resulta:

Para 9 PH.....	16'33 Kg.
Para 900 HP.....	6'43 »

Estos resultados demuestran la conveniencia de emplear turbinas de gran potencia para obtener buenos rendimientos. En las centrales térmicas de Barcelona están funcionando turboalternadores de 20000 HP.

Los turboalternadores son, pues, grupos generadores de gran potencia y elevada velocidad.

Condiciones que debe reunir un turboalternador.

El alternador destinado a un grupo turbogenerador es siempre del tipo de inductor móvil y está fundado en el mismo principio que los alternadores ordinarios, pero su construcción ha de reunir ciertas condiciones especiales cuya necesidad vamos a demostrar.

1.^a Si se tiene en cuenta el gran número de revoluciones a que está sometido el rotor y la magnitud que debe tener por tratarse de generadores de mucha potencia, se comprende el gran desarrollo que adquiere en ellos la fuerza centrífuga, toda vez que ésta aumenta con el cuadrado del número de revoluciones y con el radio.

Las piezas del rotor quedan sometidas a esfuerzos tangenciales enormes y, para que tengan solidez, es preciso escoger escrupulosamente sus materiales; en su fabricación debe emplearse exclusivamente el acero forjado, que puede resistir fuertes cargas, excluyendo por completo la fundición.

En su constitución deben entrar el menor número posible de piezas y la fijación de éstas debe ser concéntrica, para que descansen sobre el cuerpo rotatorio.

2.^a Siendo los turboalternadores máquinas de gran potencia, la cantidad de energía eléctrica en ellos transformada en calor, será considerable; además, como son máquinas de gran velocidad, su superficie de enfriamiento será pequeña (pág. 65) y

para perder mucho calor en pequeña superficie hará falta una refrigeración muy eficaz. Es general el caso de transformarse una potencia de varios miles de caballos en un espacio de pocos metros cúbicos y, por lo tanto, el problema de dar salida al calor que en ellos se desarrolla no es nada fácil.

Desde luego, todos los turboalternadores son de construcción cerrada y ventilación más que forzada, pero además los canales de ventilación deben estar muy bien dispuestos para que la refrigeración sea rápida.

3.^a Cualquier desequilibrio del rotor, por pequeño que sea, tratándose de un órgano muy pesado y sometido a gran velocidad, puede ser causa de trepidaciones o vibraciones que alcancen el período de vibración propio del rotor y determinen en él fenómenos de resonancia, que, al reforzar la amplitud de las vibraciones, pueden llegar a torcer el eje e inutilizar la máquina. Por eso, el rotor de un turbogenerador debe estar muy bien equilibrado estática y dinámicamente.

Bajo estas tres condiciones, de construcción sólida, ventilación y equilibrio, estudiaremos ese tipo especial de alternador.

Inductores. — La forma clásica de inductor bipolar es el de núcleo en doble T; como ejemplo de este tipo, vamos a detallar el modelo de la Compañía General de Electricidad, representado en corte transversal y axil en la figura 53.

El cuerpo del rotor es un cilindro macizo *C*, de acero forjado, con dos canales abiertos a lo largo

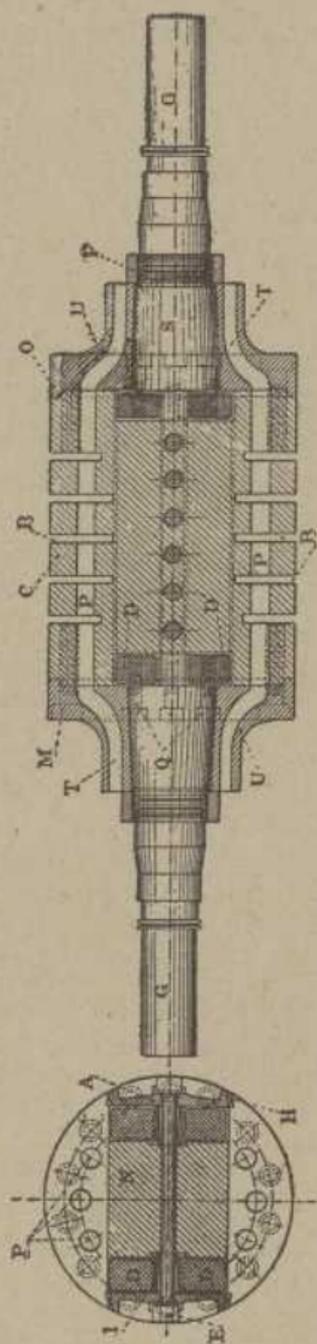


Fig. 53

del eje, uno en cada cara, que le dan forma de doble T, constituyendo el núcleo N más estrecho que las piezas polares; en ellos se alojan los dos carretes inductores D y D' , sujetos longitudinalmente por dos piezas de bronce A , sujetas entre sí por los pernos E y al núcleo por las cuñas H . Los pernos E llevan un manguito I que los aísla de los carretes.

El eje lo forman dos piezas S , una a cada extremo, unidas al cubo del núcleo por una caperuza circular U , de bronce, enchufada a una ranura circular O y sujeta por los tornillos Q . Las mismas caperuzas sujetan las cabezas de los carretes D . Las caperuzas y la pieza S se unen por medio de la rosca F . Los extremos del eje acaban en gorrones G , de menor diámetro, que tienen su asiento en los soportes.

Para su ventilación, tiene el rotor, seis canales axiales P , que llevan el aire a varios canales radiales R . La entrada de aire a los canales P se efectúa por unos canales T que, situados en la caperuza U , cazan con ellos.

De la simple descripción de este modelo, se advierte la gran rigidez del enlace de todas las piezas que entran en su constitución, y la forma de ensamble del eje permite cualquier dilatación del núcleo sin peligro en su unión.

El tipo de inductor tetrapolar y exapolar de mayor seguridad, es el de superficie cilíndrica ranurada, cual aparecen en la figura 54.

El cuerpo del rotor, de forma cilíndrica, es de acero forjado y empotrado al eje, también de acero. En su superficie se han practicado unas ranuras

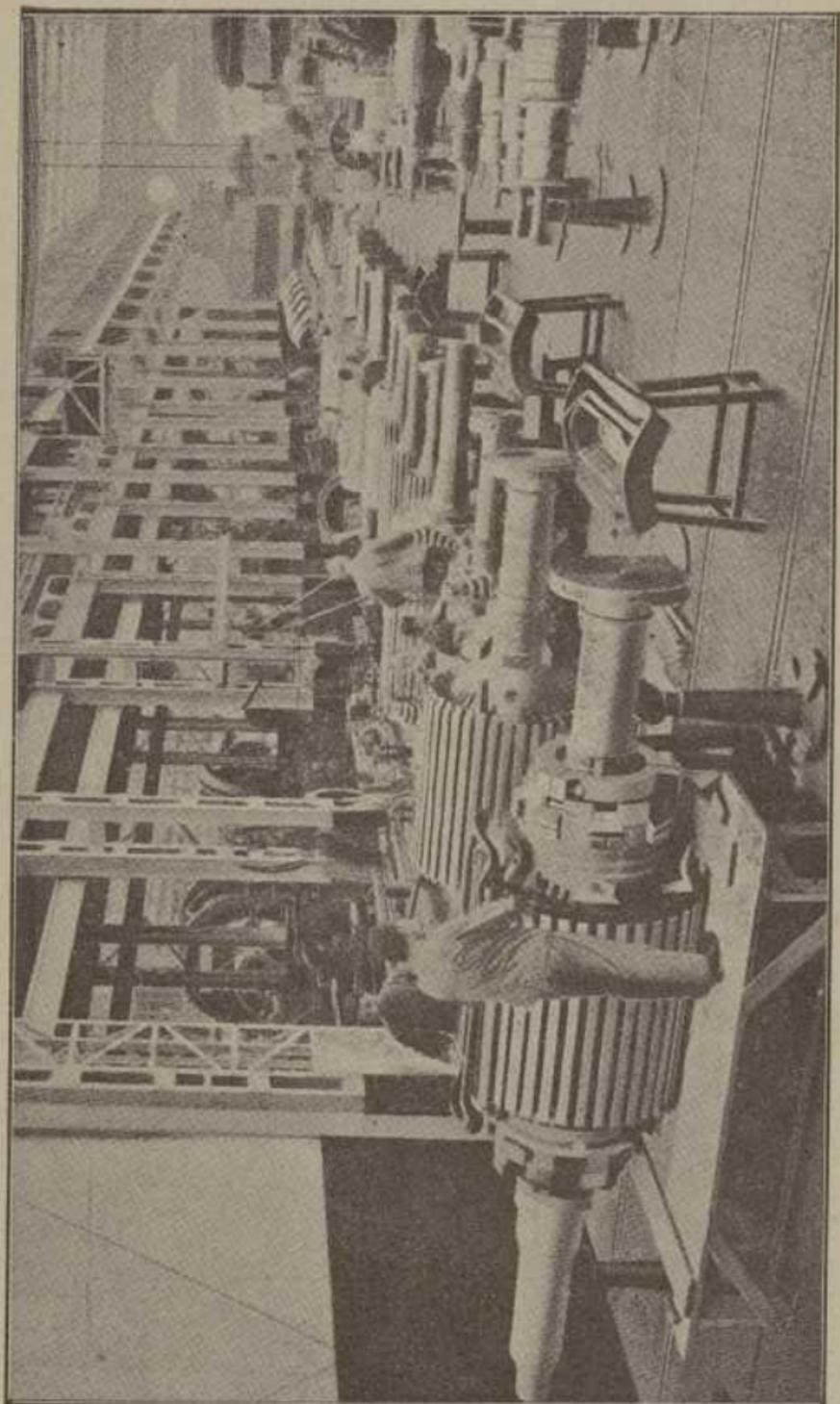


Fig. 54. — Sala de devanado de la Siemens Schuckert. Grupo de inductores en curso de fabricación.

fresadas, para asentar el arrollamiento de excitación. El espacio inferior de la ranura se deja algo más estrecho, a fin de que las secciones del devanado no lleguen al fondo de la ranura, que, de este modo, queda en parte vacía, formándose en cada ranura un canal axial de ventilación.

Los dientes de las ranuras acaban en cola de milano, que sirve de ensamble a una cuña de bronce, que cierra la ranura y sujeta el devanado inductor.

Este devanado se compone de secciones de cobre plano, en forma de cinta, que se arrollan sobre moldes especiales de manera que las espiras se superpongan por el lado plano. Las secciones se aíslan dentro de las ranuras, con gran cuidado, y una vez sujetas a presión, por la cuña de metal, no hay que temer en ellas la acción de la fuerza centrífuga.

Las cabezas de las secciones se aseguran contra la fuerza centrífuga por medio de una caperuza cilíndrica, de acero, que se superpone al rotor en estado caliente. Este sistema de sujeción, empleado por la casa Siemens Schuckert, resulta mucho mejor y más seguro que el antiguo sistema de vendos o cinchos formados por alambre de acero estañado.

A las cabezas de las secciones se les da forma a propósito para que se adapten a las paredes interiores de las caperuzas, y éstas están forradas de una capa aislante como se puede observar en la figura 55.

El conjunto del rotor, con su devanado sujeto por las cuñas y las caperuzas extremas, se tornea para darle una superficie cilíndrica lisa; que evita

el ruido molesto durante la marcha y gran parte de la pérdida por rozamiento del aire.

Las caras frontales de las caperuzas llevan un ventilador de paletas, impelente el uno *i* (fig. 55)

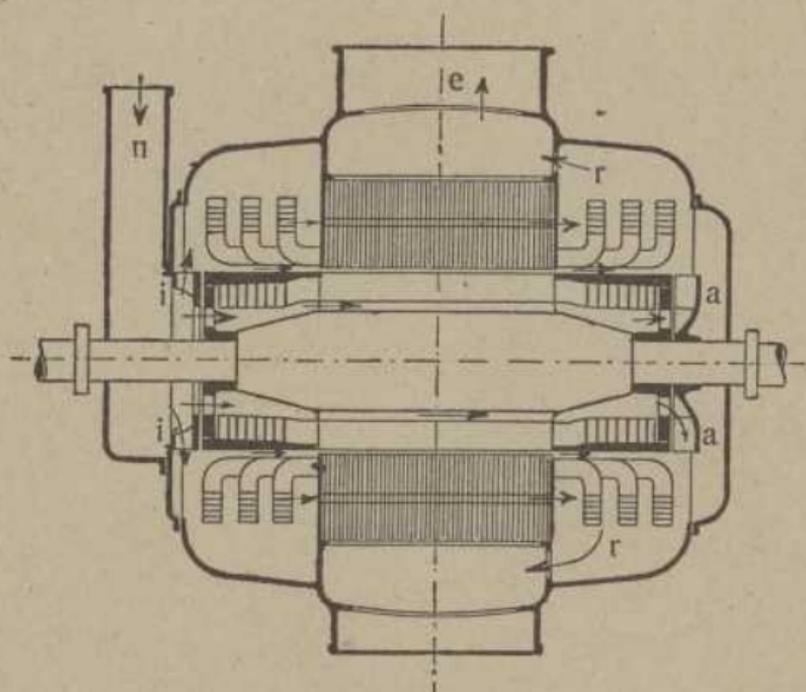


Fig. 55

y aspirante el otro *a*; los dos toman el aire del exterior, conducido por el tubo *n*, el ventilador *a* lo aspira a lo largo de los canales axiales del rotor y el ventilador *i* lo inyecta a la armazón cerrada del estator, de allí pasa a la cara opuesta, parte por el entrehierro, refrescando las superficies de estator y rotor, y parte por las ranuras del inducido que, como las del inductor, están provistas de canales axiales. En la cara opuesta *r*, se reúne el aire ca-

liente y pasa al canal de escape e , que lo lleva fuera de la sala de máquinas.

Este sistema de ventilación es sumamente eficaz, ya que el aire frío actúa directamente sobre los arrollamientos, que son siempre la parte más caliente, y al propio tiempo pasa rozando por una gran superficie de hierro, tanto de la armadura del inducido como de la del inductor.

El rotor de los turbogeneradores, no sólo debe someterse a la prueba de equilibrio estático y la de lanzamiento, como los inductores ordinarios (capítulo II), sino que debe ser probado en su equilibrio dinámico. Esta prueba consiste en hacer girar el rotor a velocidad conveniente y registrar sus saltos, para compensar las cargas y anularlos.

En la prueba preliminar de equilibrio estático (página 53) se ha comprobado el reparto uniforme de material por los distintos radios del rotor, y en la prueba de equilibrio dinámico, se comprueba si la carga de cada radio se reparte uniformemente a lo largo de su generatriz cilíndrica.

Si las generatrices de la superficie cilíndrica resultasen con diferentes cargas en sus extremos, la desigual fuerza centrífuga que actuaría en ellos determinaría una fuerte vibración; por eso es de imperiosa necesidad el equilibrio dinámico en los turboalternadores.

Los pesos de tara se colocan en el extremo menos cargado de la generatriz no equilibrada, y, a fin de no alterar el equilibrio estático, se da una carga igual al extremo opuesto de la generatriz diametral. Para la colocación de los pesos de tara, tienen

las capezuzas extremas una ranura circular en su cara frontal.

Inducido. — Los inducidos de turboalternador no tienen otra variante sobre los inducidos estáticos de alternador (cap. II), que la sujeción de las conexiones frontales de su devanado, sujeción que

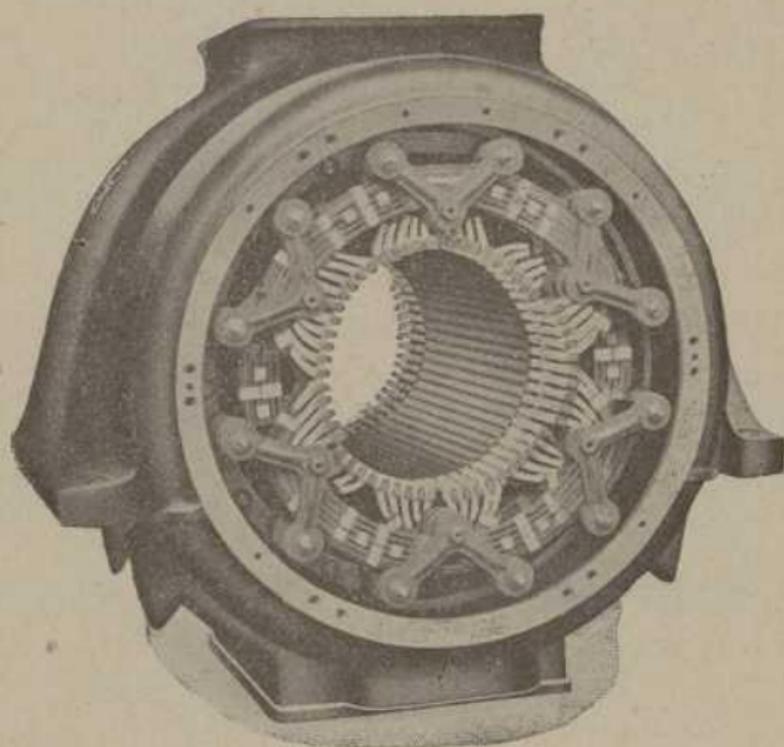


Fig. 56

ya habíamos indicado para los alternadores de gran potencia (pág. 64) y que tiene por objeto evitar los mismos efectos, o sea, el de contrarrestar los esfuerzos de repulsión que se producen en las conexiones al ocurrir un corto circuito.

La figura 56, es el estátor de un turboalternador fabricado por la Siemens Schuckert; en él pueden apreciarse perfectamente los pernos de sujeción de las conexiones frontales.

El devanado, que es de fases superpuestas, lo forman seis secciones y, siendo trifásico, corresponden dos a cada fase. Las dos únicas secciones de una misma fase deben estar separadas 1 : 2 circunferencia; es decir, cada dos secciones diametrales

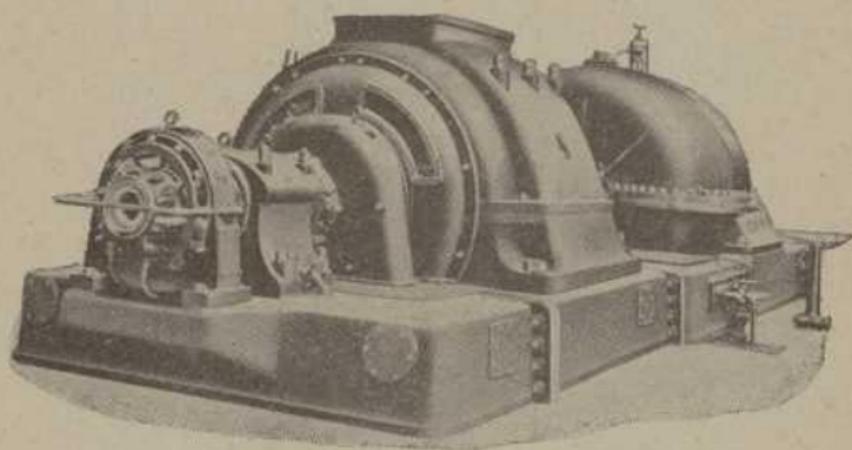


Fig. 57. — Turboalternador Siemens Schuckert

forman fase. En la figura se observa que dos secciones diametrales tienen las ramas contiguas, según ésto, el devanado es de secciones cortas (página 97) y el número de polos dos (uno por sección).

Cada sección consta de $u = 5$ madejas, de modo que el total de ranuras del inducido es: (pág. 103)

$$2 \times 6 \phi u = 2 \cdot 6 \cdot 1 \cdot 5 = 60 \text{ ranuras}$$

La figura 57, representa un turboalternador de 5300 K. V. A. y 1500 revoluciones, construido por la Siemens Schuckert. En primer término se ve la dínamo excitadora, antes del primer soporte; después de éste viene el colector de anillos, para la corriente inductora, y en seguida el alternador, viéndose en su cara anterior la cámara de entrada del aire para la refrigeración y la tapa frontal con dos ventanas de registro. En último término está la turbina.

El conjunto va montado sobre tres soportes, en la misma placa de fundación.



CAPÍTULO VI

ACOPLAMIENTO DE ALTERNADORES

Central de unidades múltiples. — La reunión de varios generadores sobre unas barras o red distribuidora, tiene lugar siempre que el gasto de la red es superior a la potencia que puede suministrar un solo generador.

Si el gasto de la red es constante, la central puede contar con un solo generador que dé toda la potencia que hace falta a la red; pero cuando la carga de ésta varía en las distintas horas del día, caso general de una red con muchos abonados, en lugar de tener un generador capaz para la potencia total es preferible subdividir ésta en dos, tres o más generadores. Así, en las horas de carga mínima, un solo generador basta para alimentar la red y, a medida que ésta se cargue, se ponen en marcha los generadores de reserva para sumar la potencia que haga falta en un momento dado.

Este sistema, que podemos llamar de unidades múltiples, tiene la ventaja, sobre el sistema de unidad única, de facilitar la limpieza, inspección y reparación de los generadores, sin necesidad de

interrumpir el servicio en la red, aprovechando siempre, para dichas operaciones, las horas de poca carga; además, se puede procurar que los generadores trabajen siempre entre los tres cuartos de carga y la plena carga, condición para sacar de ellos un buen rendimiento.

Por otra parte, una central de unidades múltiples es siempre susceptible de ampliar sin grandes alteraciones en su instalación, basta sencillamente aumentar en una sus unidades.

En general, pues, las centrales eléctricas constan de varios grupos generadores, para ponerlos en servicio cuando las necesidades del consumo lo requieren, y de una instalación de barras colectoras y aparatos de maniobra, estudiada para acoplar cómodamente todos los generadores.

Acoplamiento de generadores. — Un grupo de generadores puede acoplarse, para reunir sus potencias, *en serie y en paralelo*.

El acoplamiento en serie, llamado también *en tensión*, suma las tensiones de los generadores, conservando la corriente de un generador en todo el circuito.

El acoplamiento en paralelo, llamado también *en cantidad*, suma las corrientes de todos los generadores y mantiene como tensión constante, la de un generador.

El acoplamiento en cantidad exige generadores de igual tensión, mientras que para el acoplamiento en tensión es condición indispensable que los generadores sean de igual intensidad de corriente.

El acoplamiento en tensión se adopta siempre que hace falta aumentar la tensión de un circuito, y el acoplamiento en cantidad está adecuado cuando conviene aumentar la cantidad o la intensidad de corriente.

La tensión de un circuito de corriente alterna, puede ser aumentada empleando transformadores estáticos (tomo VIII), con más facilidad que acoplando alternadores en serie. En efecto, tenemos dicho que el acoplamiento en serie exige la misma corriente en todo el circuito; esa condición, fácil de conseguir con corriente continua, resulta casi imposible tratándose de corrientes alternas de distintos alternadores que, no marchando rigurosamente a la misma velocidad, tendrán distinta fase y no estando en concordancia de fase no puede resultar una sola corriente, en intensidad y fase, a lo largo del circuito.

Por eso, a pesar de las tentativas de Boucherot y de Leblanc, el acoplamiento en serie de los alternadores se conceptúa como imposible y se desiste de él, mayormente no siendo necesario, gracias al empleo de los transformadores estáticos que, con mayor elasticidad, resuelven el problema de elevar la tensión.

Cuando conviene sumar potencias alternas, se recurre siempre al montaje en cantidad, y si al mismo tiempo debe elevarse la tensión se hace pasar la potencia total por un transformador de tensión.

Para acoplar en cantidad varios generadores de corriente continua basta que tengan la misma ten-

sión y unir en paralelo los bornes de igual signo. Para el mismo acoplamiento con generadores de corriente alterna, se necesita que tengan la misma tensión, frecuencia y fase.

La igualdad de tensiones se comprueba con volímetros; la de frecuencia, con frecuencímetros o con taquímetros y la concordancia de fase, con un indicador de fase.

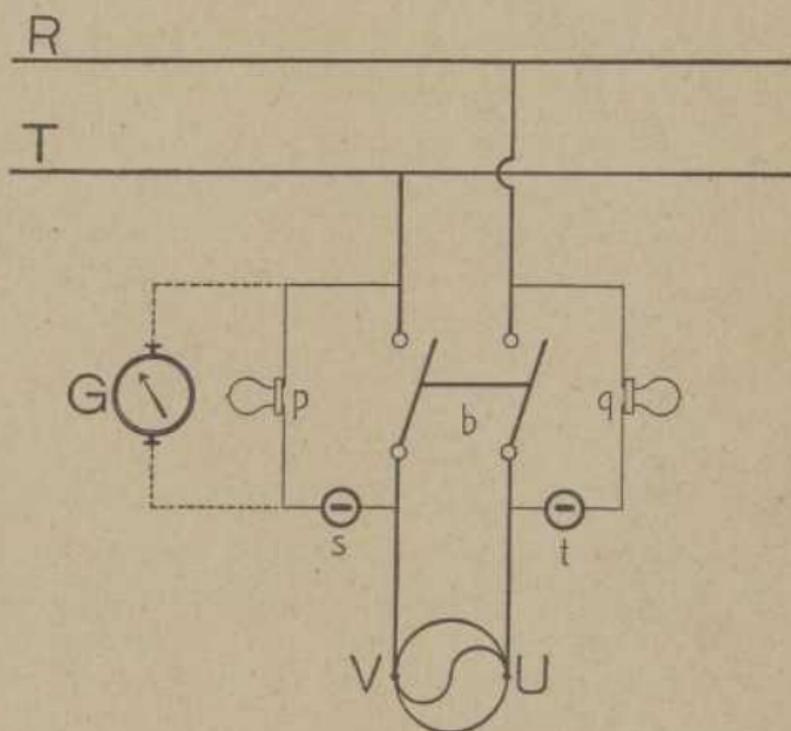


Fig. 58

Indicador de fase. — Cuando los alternadores son de baja tensión, el indicador de fase se reduce a unas lámparas de incandescencia derivadas entre los bornes que deben unirse al acoplar. El esquema de conexiones lo representamos en la figura 58.

Entre los bornes $T-V$ y $R-U$, de red y alternador, se derivan dos lámparas p, q , de igual tensión que el alternador, que los interruptores s, t ponen en circuito estando abierto el interruptor bipolar b .

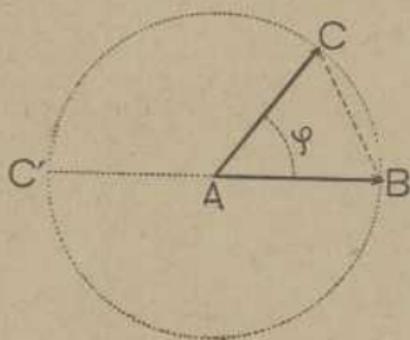


Fig. 59

Dichas lámparas quedan sometidas a la suma de tensiones de alternador y red, suma que varía según el ángulo de desfasaje de las dos tensiones. Para estudiar las variaciones de esta suma, nos valdremos de la composición de vectores representada en la figura 59.

Sea AB la tensión de la red y AC la del alternador, la tensión resultante, que actuará sobre las lámparas p, q , será BC , línea que cierre el triángulo ABC , y el ángulo de desfasaje de las tensiones φ .

Cuando el ángulo φ sea cero, AB y AC estarán en fase, BC se anula y las lámparas se apagan por falta de tensión. Al crecer el ángulo φ , la tensión BC crece hasta alcanzar un valor máximo

$B C'$, tensiones en oposición o $\varphi = 180^\circ$, para el cual las lámparas brillan con su máxima intensidad. A partir de 180° , si crece el desfase φ , disminuye $B C$ y el brillo de las lámparas, hasta llegarse a anular a los 360° , en que las tensiones vuelven a coincidir en fase.

Si el alternador que alimenta la red y el que debe ser acoplado a la misma, marchan aproximadamente a la misma velocidad, sus tensiones no coincidirán constantemente; pero tendrán momentos de coincidencia, en que las lámparas permanecerán apagadas, se separarán de fase, encendiéndose las lámparas, para volver a coincidir y apagar las lámparas después que el alternador más veloz haya adelantado una vuelta completa. Las variaciones de tensión y de luz, durante la vuelta completa, vienen dadas por las cuerdas de la circunferencia $B C C'$.

Como se ve, las lámparas del indicador se encienden y apagan cada vez que uno de los alternadores adelanta una vuelta. Cuanto más igual sea la marcha de los alternadores, más tiempo empleará el más rápido para avanzar una vuelta y las lámparas en apagar y encenderse, hasta llegar a estar siempre apagadas cuando los alternadores tengan la misma frecuencia y fase. Este momento es el que debe aprovecharse para cerrar el interruptor b (figura 58).

Maniobra de acoplamiento. — La maniobra de acoplamiento, consiste pues:

1.º Poner en marcha el alternador $U-V$ y subir

su velocidad hasta tener aproximadamente la frecuencia de la red.

2.^o Excitar el inductor hasta que el alternador dé la misma tensión que la red.

3.^o Cerrar los interruptores *s* y *t* del indicador de fase y modificar la velocidad del alternador hasta igualar las fases por tiempo suficiente para cerrar el interruptor *b*.

4.^o Cerrar el interruptor *b*, aprovechando un momento de coincidencia de fases y abrir los interruptores *s* y *t* del indicador.

Después de todo esto, el alternador está ya acoplado a la red y se procede a cargarlo. Para ello se aumenta la excitación del alternador al propio tiempo que se aumenta la potencia del motor que lo acciona, dando más entrada de agua o de vapor según sea hidráulico o de vapor, siguiendo las indicaciones de los amperímetros y vatímetros.

Una vez acoplados los alternadores no es de esperar que se separen de fase, ya que si uno de ellos perdiese velocidad se descargaría instantáneamente y, aligerándose, marcharía más aprisa, por el contrario si uno de los alternadores se adelantara tomaría la carga de los otros y cargándose perdería velocidad; de modo, que los alternadores acoplados en cantidad tienden a marchar sincrónicamente a la misma velocidad, haciendo constante la frecuencia de la red.

Variantes del indicador de fase. — El indicador de fase, puede estar formado por dos lámparas, una a cada derivación, como se representan en la

figura 58, o las dos a la misma derivación dejando la otra en corto circuito, indistintamente, y también puede constar de una sola lámpara o de más de dos, pero siempre la tensión total de las lámparas debe resultar el doble de la del alternador, o sea igual a la suma BC' (fig. 59) de las tensiones en oposición, que es la máxima tensión que ha de recibir el indicador.

Algunas veces el indicador de fase se combina con un voltímetro G (fig. 58) cuya escala no tiene otra graduación que el cero, con el fin de apreciar mejor el momento de concordancia de fases. En efecto, las lámparas de incandescencia se van apagando a medida que se acerca el momento de coincidencia de fases, pero algo antes de ese momento ya no lucen o están a un rojo obscuro difícil de apreciar; en cambio el voltímetro marcará el cero, sin dudas, sólo en el momento de coincidencia.

Mientras la velocidad de los alternadores difiere mucho, el voltímetro no puede seguir las rápidas variaciones de tensión, pero al acercarse al sincronismo se pueden seguir perfectamente las oscilaciones de su aguja.

Indicador por transformación. — Si los alternadores son de alta tensión, el indicador de lámparas no puede funcionar directamente ya que necesitaría un gran número de lámparas para sumar la tensión doble. En tal caso se hace funcionar el indicador por transformación.

Los bornes de red $T-R$ y los del alternador $U-V$, de la figura 58, se unen a los devanados a y c de

un transformador de tensión (fig. 60) y la única lámpara del indicador se deriva de un tercer devanado b , del mismo transformador.

Los flujos producidos por las corrientes de a y de c se suman o se restan según estén o no en concordancia de fase, y la tensión inducida en el devanado b será máxima o nula en uno y otro caso, quedando la lámpara encendida o apagada.

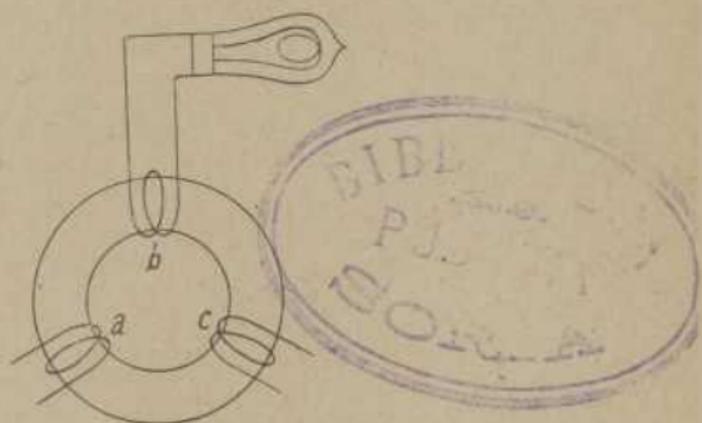


Fig. 60

Si los devanados de a y c están arrollados en el mismo sentido, se suman los flujos cuando hay concordancia y *la lámpara encendida nos indica el momento de acoplar*; por el contrario, si los devanados se arrollan en sentido contrario, se anulan los flujos en la concordancia de fases y *la lámpara apagada señala el instante de acoplar*. Como se ve, el indicador por transformación puede funcionar de dos maneras, según se hayan arrollado sus devanados o conectado sus bornes.

Para averiguar como funciona un indicador desconocido, basta aislar los bornes del alternador *U-V* y cerrar el interruptor; la manera como quede la lámpara del indicador corresponde al momento de acoplamiento.

Alternadores trifásicos. — Para acoplar alternadores trifásicos, basta comprobar la concordancia de dos de sus fases, toda vez que coincidiendo dos, las terceras deben corresponderse de igual modo.

El montaje del indicador no tiene, sobre el de la figura 58, ninguna variación, y en el esquema no debe haber más variantes que la del interruptor bipolar *b*, que pasa a ser tripolar, y un tercer hilo *W* del alternador que se corresponda con un tercero *S* de la red (según las normas de la A. E. A.). El indicador continúa con sus dos derivaciones servidas por los interruptores *s* y *t*.

Indicador de tres lámparas. — El indicador que hemos estudiado, señala los momentos de concordancia y de desacuerdo de las fases; por él sabemos si debe variar la velocidad del alternador a acoplar, pero no se sabe si tal variación debe ser positiva o negativa, y sólo después de tantearlo se encuentra el sentido conveniente de variación.

En esos tanteos se pierde tiempo, como es natural, y además resultan molestos. Un indicador perfecto debería indicar si el alternador marcha demasiado aprisa o despacio. Reune esta propiedad el indicador Siemens o de tres lámparas, aplicable

a los alternadores trifásicos, y cuyo funcionamiento vamos a estudiar.

Sean 1, 2 y 3 (fig. 61) las tensiones de la red y 1', 2' y 3', las tensiones del alternador. Tres lámparas o tres grupos de lámparas *a*, *b* y *c*, se derivan de los bornes de las tres fases; el grupo *a* entre 1-1', fases a acoplar, y los grupos *b* y *c* entre las fases saltadas 2-3' y 3-2'.

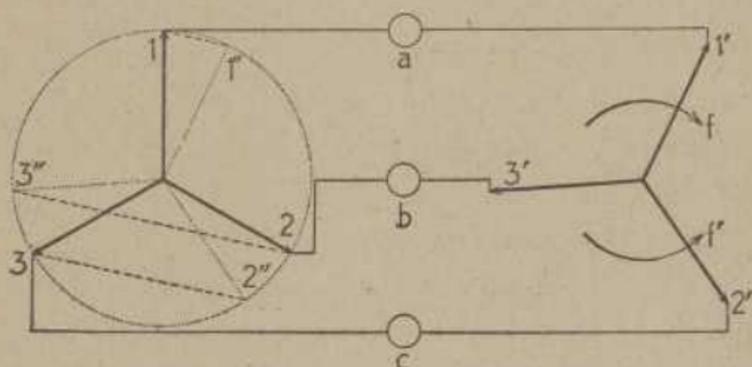


Fig. 61

En un momento cualquiera, el representado en la figura, las lámparas quedan sometidas a las tensiones:

1 - 1''	el grupo <i>a</i>
2 - 3''	» <i>b</i>
3 - 2''	» <i>c</i>

La lámpara *a* estará casi apagada, la *b* muy encendida y la *c* con brillo intermedio.

Si el alternador marcha demasiado aprisa, sus fases 1', 2' y 3' avanzan en el sentido de la flecha *f*, con lo cual crece la tensión de *a* y de *b*, y decrece la de *c*. Esta lámpara se apagará encendiéndose *a*,

de modo que *si después de a se apaga c, será señal de que el alternador marcha demasiado aprisa.*

Si la velocidad del alternador es menor que la correspondiente a la frecuencia de la red, sus fases 1', 2' y 3' se atrasan en el sentido de la flecha *f'* y las tensiones de *a* y *b* decrecen, mientras la de *c* aumenta. La lámpara *a* se apagará por completo y un tercio de vuelta más tarde se apagará *b*; así pues, *si después de la lámpara a se apaga la b es señal de que el alternador marcha despacio.*

Claro está que el momento de acoplar será cuando esté apagada la lámpara *a*, derivada sobre fases coincidentes, las que deben ser acopladas.

Las tres lámparas se disponen en círculo y así la apagada determina una zona oscura, que gira en uno u otro sentido según convenga aumentar o disminuir la velocidad del alternador. Unas placas de dirección indican cuál es el sentido que corresponde a la mayor y a la menor velocidad del alternador.

Oscilaciones de velocidad en alternadores acoplados. — Hemos indicado que, una vez acoplados los alternadores procuran marchar a la velocidad de sincronismo, toda vez que si un alternador se adelanta recibe un aumento de carga que frena su aceleración, y cuando se retrasa suelta la carga aumentando su velocidad.

Estos saltos de velocidad, acelerantes y retardantes, no cesan en el momento mismo que se restablece la velocidad de sincronismo; ya que, en virtud de la inercia, el rotor tiene afán de conservar

la velocidad que ha recibido, y por un instante, el rotor que marchaba más aprisa de la velocidad sincrónica quiere marchar más abajo que ésta, y el rotor que marchaba por debajo de dicha velocidad pretende girar más aprisa que la misma. En resumen, el alternador que gira más aprisa o más despacio de la velocidad sincrónica recibe una impulsión negativa o positiva para restablecer su velo-

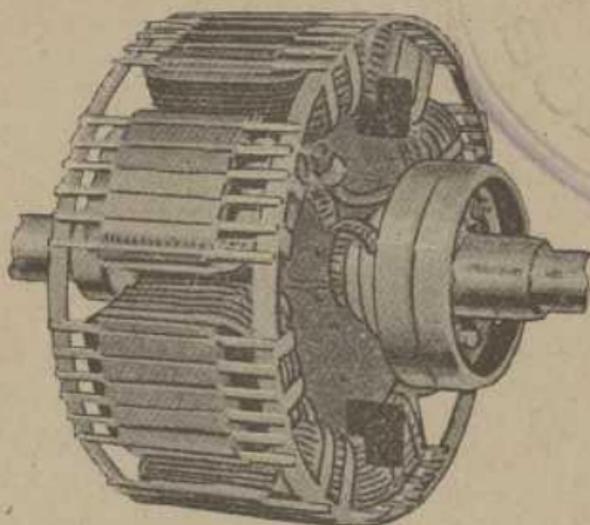


Fig. 62

cidad, impulsión que dura más allá de lo que debería, hasta que sobreviene una impulsión de sentido contrario; y el conjunto de todas esas impulsiones alternas determinan en la velocidad del rotor unos saltos análogos a los que sufre la velocidad de un péndulo de reloj.

Dichos saltos, en general, se van amortiguando hasta anularse; pero si el período de vibración del

rótor tiene la misma frecuencia de los saltos, aparecen fenómenos de resonancia que amplían los saltos hasta llegar a alterar la marcha del alternador.

Esos fenómenos son más temibles en los alternadores monofásicos que en los polifásicos, y para evitarlos se emplea el amortiguador Hutin-Leblanc. Este amortiguador consiste en un devanado complementario del inductor, formado por una serie de varillas de cobre alojadas en las expansiones polares (fig. 62) y soldadas, por uno y otro extremo, a dos aros de cobre.

Este devanado resulta neutro mientras el rótor marcha a la velocidad de sincronismo; pero a mayor velocidad, el flujo de reacción produce sobre el devanado una corriente de carga que frena el movimiento, y a menor velocidad determina una corriente motora que acelera la marcha del rótor. El devanado amortiguador hace lo mismo que el devanado principal, pero actuando con mucha mayor fuerza reduce la amplitud de los saltos.

FIN DEL TOMO VI





ÍNDICE

	<u>Página</u>
INTRODUCCIÓN	
Fundamento y clasificación de los alternadores	5
Clasificación de los inducidos	6
Período, frecuencia y polos	7
Pulsación	8
Fuerza electromotriz, corriente y potencia.	9
Componentes de la intensidad	10
Tensiones y caídas	11
Rendimiento	12
CAPÍTULO I. — <i>Alternadores de inducido móvil.</i>	
Secciones inducidas	13
Armadura	15
Ranuras	16
Colector	19
Devanado de dinamo	21
Tipos de armaduras	21
Inducido de tambor	22
Inducido de anillo	25
Inducido de disco	27
Inductores	30
Excitación	31
Tipos industriales de alternador	34

CAPÍTULO II. — *Alternadores de inductor móvil.*

Sus ventajas	39
Inductores	40
Carretes	51
Colector	53
Equilibrio estático del rotor	53
Prueba de lanzamiento	55
Cojinetes	56
Inducido	57
Ventilación	65
Centrado magnético	72
Placa de fundación	74
Alternadores de tipo reducido	75
Alternadores de eje vertical	78

CAPÍTULO III. — *Alternadores de inducido e inductor fijos.*

Su fundamento	80
Tipo industrial	83
Alternador <i>Ærlikon</i>	84
Aplicaciones industriales de estos alternadores	88

CAPÍTULO IV. — *Alternadores polifásicos.*

Su ventaja	92
Inducidos	94
Inducido difásico	94
Inducido trifásico	101
Conexión de fases	104
Empleo de hilo neutro	109
Designación de bornes	110
Inductores	111

Relación entre polos, fases, secciones inducidas y revoluciones	111
-----------------------------------------------------------------------	-----

CAPÍTULO V. — *Turboalternadores.*

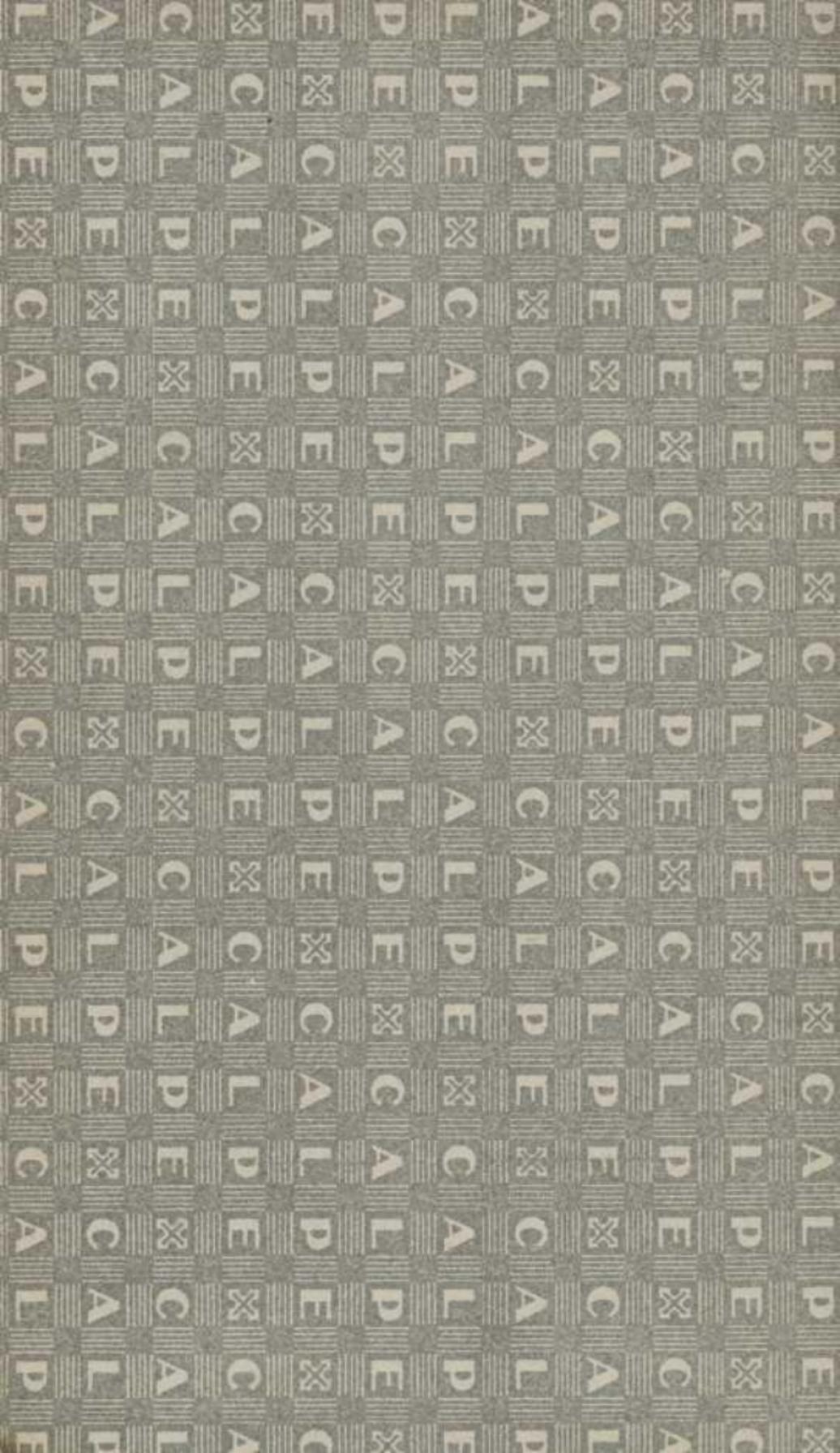
Turbina de vapor. Sus ventajas	113
Su velocidad y potencia	114
Condiciones que debe reunir un turboalternador.....	116
Inductores	117
Inducido	121

CAPÍTULO VI. — *Acoplamiento de alternadores.*

Central de unidades múltiples.....	127
Acoplamiento de generadores	128
Indicador de fase	130
Maniobra de acoplamiento	132
Variantes del indicador de fase	133
Indicador por transformación.....	134
Alternadores trifásicos	136
Indicador de tres lámparas	136
Oscilaciones de velocidad en alternadores acoplados.....	138









I
1

1001

D-2

1001