

BIBLIOTECA DEL ELECTRICISTA PRÁCTICO

MEDICIONES ELÉCTRICAS
DE TALLER



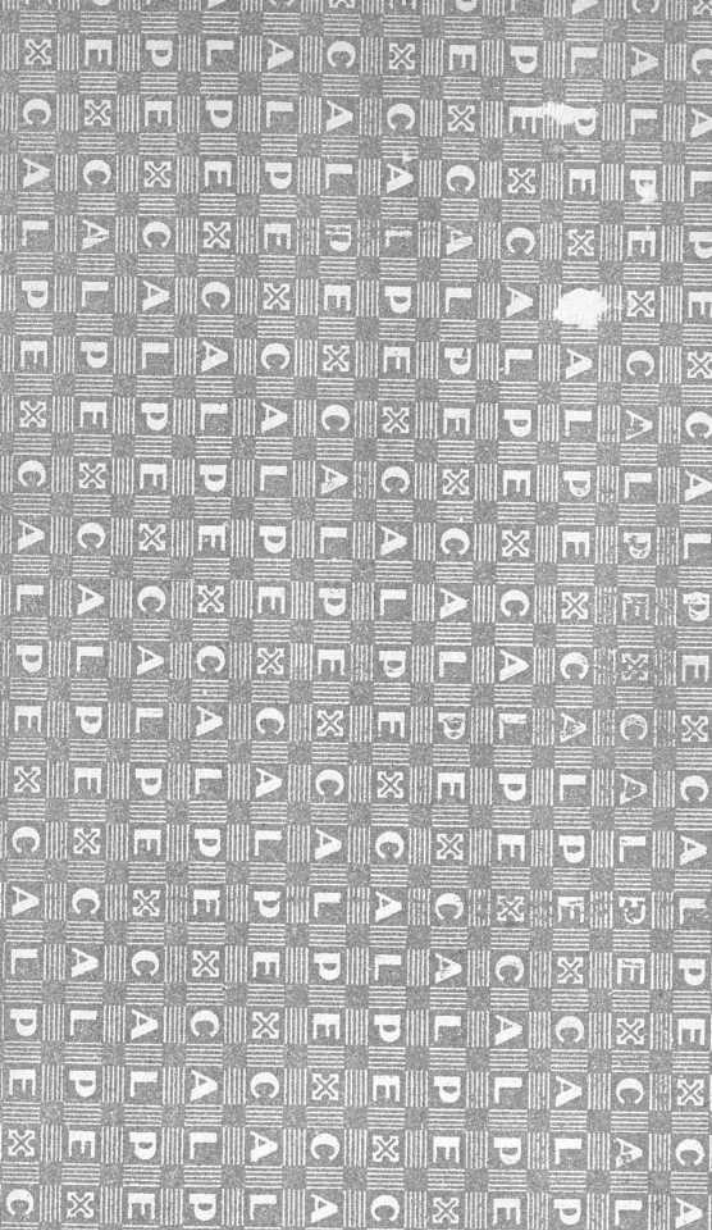
2
15
GALLACH-EDITOR

19

BARCELONA

S.G-11

X-50



20



MEDICIONES ELÉCTRICAS
DE TALLER



B. P. de Soria



61112092
D-2 1045

2
5
92



B²-3157

$\frac{6}{17}$

BIBLIOTECA DEL ELECTRICISTA PRACTICO

SERIE PRIMERA (Volúmenes 1 a 30)

PUBLICADA BAJO LA DIRECCIÓN

DE

D. RICARDO CARO Y ANCHÍA

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

TOMO XIX

MEDICIONES ELÉCTRICAS DE TALLER

— POR —

D. FRANCISCO ALSINA Y ALSINA

PERITO ELECTRICISTA

Profesor de Electricidad, Magnetismo y Electrotecnia en la
Escuela Industrial de Linares. Extécnico de los talleres de
la Industria Eléctrica-Siemens Schuckert, de Cornellá



«CALPE»

Compañía Anónima de Librería, Publicaciones y Ediciones

MADRID-BARCELONA

ES PROPIEDAD
Derechos de traducción
reservados

FORMULARIO

RECOPIACIÓN DE LAS FÓRMULAS MÁS EMPLEADAS
EN LAS PRUEBAS O MEDICIONES DESCRITAS EN
ESTE TOMO

Variación de la resistencia con la temperatura:

$$[1] \quad R_t = R_0 (1 + at) \quad (\text{pág. 13}).$$

Valor de la resistencia, dado por la ley de Ohm.

$$[2] \quad R = \frac{V}{I} \quad (\text{pág. 13}).$$

Aumento de temperatura en un devanado de
cobre, en función de sus resistencias; fría R_t , y
caliente R'_t .

$$[5] \quad t' - t = \frac{R'_t - R_t}{R_t} (250 + t) \quad (\text{pág. 32}).$$

Potencia útil de todo generador mecánico, en
función de su par resistente C' y velocidad n .

$$[6] \quad W_u = 2 \pi n C' \quad (\text{pág. 33}).$$

Constantes de un freno dinamométrico de palanca L ; para potencias resultantes en kgm., HP., y vatios.

$$\frac{2\pi L}{60}; \quad \frac{2\pi L}{60 \times 75}; \quad \frac{2\pi \times 9,8 \times L}{60}; \quad (\text{pág. 48}).$$

Pérdida de voltios V en resistencia R , no inductiva, recorrida por corriente de intensidad I .

$$V = RI \quad (\text{pág. 71}).$$

Potencia total:

$$[10] \quad W_t = W_u + W_p \quad (\text{pág. 74}).$$

Potencia útil:

$$[11] \quad W_u = W_t - W_p \quad (\text{pág. 74}).$$

Diferentes fórmulas del rendimiento:

$$[12] \quad \rho = \frac{W_u}{W_t} \quad (\text{pág. 74}).$$

$$[13] \quad \rho = \frac{W_u}{W_u + W_p} \quad (\text{pág. 75}).$$

$$[14] \quad \rho = \frac{W_t - W_p}{W_t} \quad (\text{pág. 75}).$$

Potencia total de un motor de corriente continua:

$$[15] \quad W_t = VI \quad (\text{pág. 75}).$$

Efecto Joule:

$$[17] \quad W_j = r I^2 \quad (\text{pág. } 76).$$

Fórmula del rendimiento de un motor de corriente continua; método de pérdidas separadas:

$$[18] \quad \rho = \frac{VI - rI^2 - m}{VI} \quad (\text{pág. } 77).$$

Rendimiento de una dínamo; método de pérdidas separadas: .

$$\rho = \frac{VI}{VI + rI^2 + m} \quad (\text{pág. } 86).$$

Potencia útil de un alternador monofásico:

$$[24] \quad W_u = VI \cos \varphi \quad (\text{pág. } 126).$$

Potencia útil de un alternador trifásico:

$$[25] \quad W_u = 1.73 VI \cos \varphi \quad (\text{pág. } 126).$$

Velocidad de un campo giratorio de p pares de polos y f períodos. Igual que en los alternadores:

$$[26] \quad n_1 = \frac{60 f}{p} \quad (\text{pág. } 131).$$

Velocidad relativa en un motor asincrónico:

$$[27] \quad n = n_1 - n_2 \quad (\text{pág. } 131).$$

Fórmulas del deslizamiento:

$$[28] \quad s = \frac{n}{n_1} \quad (\text{pág. 131}).$$

$$[29] \quad s = 1 - \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{pág. 131}).$$

Fórmulas de la potencia total de un motor asincrónico:

$$[30] \quad W_t = m + W_h + W_c + W_{cc} + W_u \quad (\text{pág. 134}).$$

$$[31] \quad W_t = W_v + W_{cc} + W_u \quad (\text{pág. 134}).$$

Factor de potencia en circuitos trifásicos:

$$[32] \quad \cos \varphi = \frac{W_t}{\sqrt{3} VI} \quad (\text{pág. 138}).$$

Factor de potencia en circuitos monofásicos:

$$\cos \varphi = \frac{W_t}{VI} \quad (\text{pág. 138}).$$

Rendimiento de un motor asincrónico; método de pérdidas separadas:

$$[33] \quad \rho = \frac{W_t - W_v - W_{cc}}{W_t} \quad (\text{pág. 142}).$$

Rendimiento de un motor asincrónico; método del deslizamiento:

$$[34] \quad \rho = \frac{n_2}{n_1} \left(1 - \frac{W_h + W_c}{W_t} \right) \quad (\text{pág. 146}).$$



PRELIMINARES

Toda máquina eléctrica, nueva o modificada, debe someterse, en el mismo taller de construcción, a una serie de pruebas o mediciones suficientes para comprobar la bondad y buen funcionamiento de la misma.

Una casa constructora de material eléctrico, cuanto más cuidado ponga en la prueba de sus máquinas y aparatos, mayor será el crédito y fama que alcance en el mercado, por el mismo uso de sus productos.

La primera vez que se fabrica un aparato eléctrico de nuevo modelo, es cuando más derroche debe hacerse en los ensayos del mismo, para poder comprobar todos os pormenores del funcionamiento y separar bien las pérdidas de distinta naturaleza que puede tener.

En general, cuando se fabrica en serie sobre un modelo ya detenidamente ensayado, no es necesario repetir todas las pruebas en cada ejemplar, basta someterlos solamente a las más indispensables de rendimiento, potencia y aislamiento.

En máquinas terminadas de fabricación, es muy frecuente que funcionen en buenas condic-

nes y sin aparentar defecto alguno durante los primeros momentos de marcha, y sólo después de haberse calentado fuertemente por una carga prolongada, aparecen defectillos, casi siempre debidos a soldaduras deficientes, que estropean el buen funcionamiento de la máquina. Por eso debemos recomendar que no se tomen los datos del ensayo de una máquina eléctrica, sino después de tres o cuatro horas de funcionamiento a plena carga, para dar tiempo a que se calienten y prueben todos los empalmes.

No sólo es indispensable probar una máquina para tener la seguridad de que reúne las condiciones pedidas por el comprador; sino que además es conveniente, porque de su estudio pueden sacarse ideas de perfeccionamiento para la fabricación de nuevos modelos y así, por el mismo trabajo diario y regular, poder contribuir, poquito a poco, al mejoramiento del material de la propia fabricación y al progreso general de la Industria Eléctrica.

Las operaciones que requiere el ensayo o estudio de una máquina eléctrica, pueden dividirse en dos grupos de ejecución muy distinta; uno, formado por la serie de mediciones que deben hacerse en el taller, sobre la misma máquina, por personal especializado; y otro, que comprende el trabajo de gabinete, constituido por las operaciones de cálculo y trazado de las características, y que es natural sea ejecutado por el mismo que haya proyectado la máquina, para que pueda cortejar la idea con la realidad.

Para cada uno de los grupos en que se clasifican las máquinas eléctricas, se han ideado distintos métodos de ensayo, entre los cuales se puede escoger el más adaptable a los aparatos de medición y máquinas auxiliares disponibles en el sitio de prueba.

En este tomo nos proponemos estudiar casi todos los métodos de ensayo, excluyendo alguno que por su elevada teoría, no sería comprensible por la mayoría de los lectores, a quienes va dedicada especialmente esta Biblioteca Práctica.

Cada método que exponamos, después de razonar muy elementalmente su fundamento y detallar el mecanismo de la operación, procuraremos acompañarlo de un ejemplo práctico, sacado de casos reales, que pueda servir de modelo para aquellos de nuestros lectores que tengan ocasión de aplicar las teorías aquí expuestas.

CAPÍTULO I

MEDICIÓN DE RESISTENCIAS

La primera prueba que conviene efectuar en toda máquina eléctrica recién construída o averiada, es medir la resistencia de los distintos devanados de que consta, para ver si aproximadamente son iguales a las resistencias que se calcularon al proyectarla.

Cotejando las resistencias medidas con las calculadas, se ve inmediatamente si ha habido error, en el devanado de la máquina; en este caso puede advertirse fácilmente la naturaleza del error cometido y, sin muchos tanteos, se consigue encontrar dónde radica el defecto.

Conviene advertir que cuando la diferencia entre la resistencia medida y la calculada no pasa de un 10 %, debe despreciarse, ya que estas pequeñas variaciones provienen de la temperatura a que se mide (tomo X, pág. 21), o también de la distinta conductibilidad del cobre empleado y de la dificultad de medir exactamente la longitud del hilo que va a entrar en el devanado.

Al medir la resistencia de un circuito, conviene registrar su temperatura para poder deducir,

siempre que se necesite, la resistencia que tendrá a otra temperatura cualquiera, por medio de la fórmula

$$R_t = R_o (1 + at) \quad [1]$$

en la que R_t , representa la resistencia a t^o ; R_o , la misma a 0^o ; t , la temperatura a que se opera; y a , un coeficiente propio de cada metal, siendo para el cobre $a = 0'004$.

Método de caída óhmica. — La resistencia de un circuito puede medirse siguiendo uno cualquiera de los procedimientos descritos en el tomo XVIII de esta misma Biblioteca; pero tratándose de mediciones de taller, el método más sencillo y menos entretenido es el de caída óhmica, fundado en la ley de Ohm.

$$R = \frac{V}{I} \quad [2]$$

Para aplicar este método debe disponerse de un reóstato regulador; un miliamperímetro, provisto de un shunt para distintas sensibilidades; un milivoltímetro con un reductor para varias escalas y un generador de corriente continua. Con todos estos aparatos y la resistencia que se quiere medir, se monta el circuito representado en la figura 1.

El reóstato R' , el miliamperímetro A , y la resistencia R , puestos en serie, se derivan de los polos P , N , del generador C ; y el milivoltímetro V , con su reductor r , se derivan de los extremos x , y , de la resistencia R .

El reóstato R' , sirve para limitar la corriente en el circuito; el miliamperímetro para apreciarla, y el milivoltímetro para leer la caída de tensión producida en la resistencia R . Para conocer esta resistencia, basta partir las indicaciones de V , en voltios, por las de A , en amperios, y el cociente

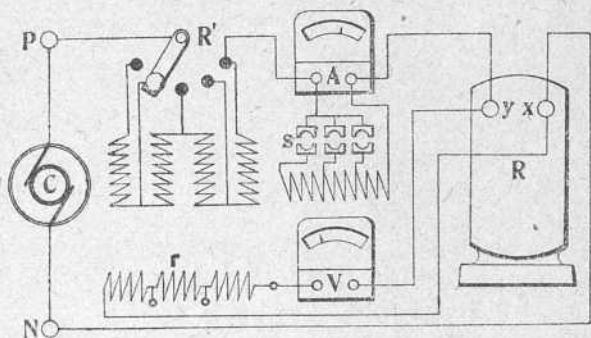


Fig. 1

nos dará la resistencia en ohmios; según se deduce de la fórmula [2].

A fin de que esta división sea fácil de efectuar mentalmente, puede regularse la corriente, mediante el reóstato R' , para que las indicaciones de A , correspondan a 0'001; 0'01; 0'1; 1; 2; 5; 10;.... amperios.

EJEMPLO. *Se desea saber la resistencia de un circuito que al ser recorrido por una corriente de 100 miliamperios, existe entre sus bornes una diferencia de tensión de 135 milivoltios.*

Primero debemos reducir la corriente a amperios y la tensión a voltios.

100 miliamperios equivalen a 0'1 amperios, 135 milivoltios equivalen a 0'135 voltios.

Aplicando la fórmula [2] tendremos:

$$R = \frac{0'135}{0'1} = 1\ 35 \text{ ohmios.}$$

El mismo resultado hubiéramos obtenido dividiendo la tensión en milivoltios por la corriente, en miliamperios; ya que en esto no habríamos hecho más que multiplicar el dividendo y el divisor por el mismo número 1000, con lo cual el cociente no puede variar.

Si se mide la resistencia de un circuito tal como acabamos de explicar, se comete un pequeño error debido a que el miliamperímetro A , además de registrar la corriente que circula por R , mide al mismo tiempo la que se deriva por el milivoltímetro; y, como puede verse en la fórmula [2], la resistencia hallada será menor que la real, por haber tomado un divisor superior al debido.

Cuando se trata de mediciones industriales, este error es despreciable; pero puede disminuirse bastante operando del modo siguiente:

En el esquema de la figura 1, sin tener derivado el milivoltímetro V , de los bornes x , y , se lanza la corriente a través del circuito R' , A , R , y con el reóstato R' , se regula la resistencia del mismo, hasta que las indicaciones de A , correspondan a la intensidad que se quiere, entonces se deriva el

milivoltímetro entre x , y ; la corriente del circuito subirá, pero manteniendo fija la posición del reóstato, se lee la desviación de V ; en seguida se interrumpe el circuito voltimétrico y se observa si A , vuelve a registrar la corriente primera, para asegurarnos de si la tensión entre los bordes P y N , del generador se ha mantenido constante durante la medición. Tomando las indicaciones del amperímetro cuando no está derivado el voltímetro, la corriente medida se aproxima más a la que circula por la resistencia en el momento de medir la caída que produce.

Si se quiere medir exactamente una resistencia empleando el método de caída óhmica, la medición debe efectuarse del modo siguiente: Teniendo derivado el milivoltímetro V , tal como indica la figura 1, se regula la corriente del circuito hasta tener en A , la indicación que convenga, y se lee la desviación de V . Por la constante de este aparato, o por su resistencia se puede calcular la corriente derivada por él; conocida la corriente que circula por V , podemos descontarla de la total medida en A , y partiendo la caída entre x , y , por la diferencia de corriente, tendremos la resistencia de R , con toda exactitud.

EJEMPLO. Se desea saber la resistencia de un circuito que al ser recorrido por una corriente de 100 miliamperios produce una caída de tensión de 135 milivoltios, medida con un voltímetro de 10 ohmios.

La corriente que circula por el voltímetro, según la ley de Ohm, debe ser

$$I = \frac{V}{R} = \frac{0'135}{10} = 0'0135 \text{ amperios}$$

y la que pase por la resistencia R , será

$$0'1 - 0'0135 = 0'0865 \text{ amperios}$$

Por lo tanto, la resistencia del circuito, según la fórmula [2] será

$$R = \frac{0'135}{0'0865} = 1'56 \text{ ohmios}$$

Resultado un poco mayor que el obtenido en el ejemplo anterior.

Cuando el circuito, cuya resistencia va a medirse, es inductivo, debe lanzarse la corriente por él antes de conectar el milivoltímetro, y este aparato debe retirarse antes de interrumpir la corriente en el circuito, así se evita que la tensión debida a la autoinducción del circuito, que puede ser superior a la caída óhmica, llegue a quemar el milivoltímetro.

Mediciones en máquinas de corriente continua.—

Para medir las resistencias del estátor de una máquina de corriente continua, se miden separadamente, el inductor shunt, el serie y los polos auxiliares. Si en la medición total de cada una de estas partes se encuentra alguna cuya resistencia no corresponde a la calculada, se mide entonces la caída por carrete para separar el que resulte defectuoso.

Los defectos más frecuentes en estos circuitos son, contactos entre espiras y cambio de carretes procedentes de otras máquinas en construcción, y que tengan exteriormente las mismas dimensiones, pero distinto hilo.

El rotor debe medirse de distinto modo según su devanado sea ondulado o imbricado.

Si es imbricado en paralelo, debe medirse con todas las escobillas puestas, y derivando el milivoltímetro después de las escobillas, sobre las mismas delgas del colector en que se apoyen dos escobillas de polos distintos, así no entrará en la medición la resistencia de contacto de los carbones.

Si se trata de un devanado ondulado en serie simple, se mide la resistencia solamente con dos escobillas puestas y procurando que no se apoyen en más de una delga, para lo cual puede disponerse un hilo plano de cobre entre la escobilla y la delga; el milivoltímetro se deriva de las delgas por las que entra la corriente.

Caso de no concordar la resistencia medida con la calculada, se busca dónde está el defecto, comprobando, con el milivoltímetro, si la diferencia de tensión entre dos delgas consecutivas permanece constante en todo el perímetro del colector.

Si se encuentran dos delgas contiguas que tengan una caída superior a las demás, será que las conexiones correspondientes están mal soldadas.

Si la caída es menor, será que la madeja correspondiente tiene contacto entre espiras, y si la caída es nula, el contacto debe ser entre las delgas del colector o entre las conexiones.

Cuando hay interrupción en una sección, se nota que todas las secciones correspondientes al mismo circuito no presentan caída óhmica y cuando se llega a las delgas pertenecientes a la sección interrumpida, la diferencia de tensión que se encuentra es igual a la existente entre escobillas.

Mediciones en máquinas de corriente alterna. —

En toda máquina de corriente alterna se debe

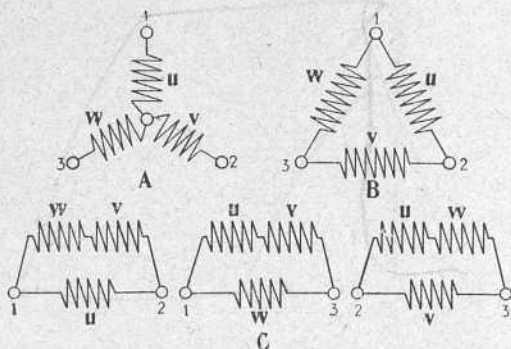


Fig. 2

medir la resistencia del circuito inductor y la del inducido, y en caso de ser la máquina polifásica debe medirse la resistencia por fase.

Cuando las fases están conectadas en estrella y el neutro es accesible, es fácil medir por separado la resistencia de cada fase, dando corriente entre el neutro y el extremo de la fase que se quiere medir, y derivando el milivoltímetro en los puntos de entrada y salida de la corriente; pero cuando el neutro no es accesible, puede me-

dirse la resistencia por fase, efectuando tres mediciones; mandando la corriente a los bornes de dos fases y permutándolos en cada medición. Así si la conexión es tal como se representa en *A* de la figura 2, haremos una medición entre 1 y 2; otra entre 1 y 3; y otra entre 2 y 3; las resistencias obtenidas en cada medición serán:

$$R_{1,2} = u + v$$

$$R_{1,3} = u + w$$

$$R_{2,3} = v + w$$

Si las tres mediciones son iguales y aproximadamente valen el doble de la resistencia calculada, puede aceptarse el devanado como bueno. Ahora, si las mediciones resultan distintas, se busca la resistencia de cada fase mediante las fórmulas siguientes:

$$u = \frac{R_{1,2} + R_{1,3} - R_{2,3}}{2};$$

$$v = \frac{R_{1,2} + R_{2,3} - R_{1,3}}{2};$$

$$w = \frac{R_{1,3} + R_{2,3} - R_{1,2}}{2};$$

y los resultados obtenidos nos indicarán cuál es la fase que está mal.

Cuando las fases están conectadas en triángulo, *B* de la figura 2, se efectúan tres mediciones, como en el caso anterior, permutando los bornes en cada medición. Las resistencias medidas corresponden

a las fórmulas siguientes; deducidas del esquema C (figura 2) (1).

$$R_{1,2} = \frac{u(v+w)}{u+v+w};$$

$$R_{1,3} = \frac{w(u+v)}{u+v+w};$$

$$R_{2,3} = \frac{v(u+w)}{u+v+w};$$

Si las tres mediciones son iguales y equivalen a $\frac{1}{3}$ de la resistencia calculada por fase, el devanado está bien; pero si sale una medición distinta de las otras dos iguales, es que está mal la fase que une los bornes de entrada de la corriente en la medición desigual.

Cuando la resistencia medida por fase, no corresponde con la calculada y *la relación entre una y otra es sencilla, se puede asegurar que ha habido error en la conexión de madejas; en cambio, cuando la relación es compleja, el mal puede provenir de empalmes defectuosos, contactos entre espiras, o también de cambio de hilos.*

Para aclarar un poco las anteriores afirmaciones, vamos a estudiar un caso particular. Sea, por ejemplo, el inducido de un motor asincrónico tetrapolar; cada fase constará de dos madejas cuya resistencia vamos a suponer igual a tres ohmios. Si se ha proyectado conectar las dos madejas de cada fase en paralelo, la resistencia compuesta deberá ser de

(1). Véase el tomo X de esta Biblioteca, página 40.

$\frac{3}{2} = 1'5$ ohmios; pero si por descuido, el operario conecta las madejas en serie, al medir la resistencia encontraremos 6 ohmios en lugar de 1'5 ohmios y la relación entre la resistencia medida y la calculada será de

$$\frac{6}{1'5} = 4$$

que es una relación sencilla.

También puede ocurrir que el operario empiece a montar las dos madejas en paralelo, uniendo el final de las dos en el centro de la estrella, y luego, al unir las dos entradas con el cable de bornes, deje un hilo suelto, o por no limpiarlo bien, quede sin soldar; en este caso funcionará una sola madeja de las dos, y al medir la resistencia encontraremos tres ohmios en lugar de 1'5. Ahora, la relación entre una y otra será $\frac{3}{1'5} = 2$, que también es una relación sencilla.

En cambio, si las soldaduras de los casquillos son defectuosas, la resistencia será muy superior a la calculada, sin guardar relación con ella; igual ocurrirá en caso de haber contactos entre espiras, sino que ahora la resistencia medida estará por debajo de la calculada; y lo mismo sucedería si al ir a devanar la máquina, tomasen un hilo de distinta sección que el escogido al proyectarla.

Medida del aislamiento de una máquina. — La resistencia óhmica del aislante de una máquina eléctrica, debe ser muy grande, generalmente pasa

de un millón de ohmios, para que la pérdida de corriente a tierra sea despreciable. Dicha resistencia es siempre mayor en frío que en caliente, debido a que el valor de α fórmula [1] es negativo para los cuerpos aisladores.

La medición del aislamiento debe efectuarse después de haber calentado a máquina a la temperatura de régimen; porque así el aislamiento medido, es el de la máquina funcionando, y además el resultado corresponde a la resistencia mínima de los aislantes.

Para medir el aislamiento de un circuito, se une a uno de los polos de un generador, sea batería de pilas o dínamo, mientras el otro polo se aplica a la armazón de la máquina. La tensión V del generador obligará a circular, por la resistencia R del aislante, una corriente I que debe satisfacer la ley de Ohm.

$$R = \frac{V}{I} \quad [2]$$

Mediante esta fórmula podremos calcular la resistencia R , midiendo previamente la tensión V y la corriente I . Esta corriente es muy pequeña y para apreciarla debe medirse con un microamperímetro.

Si en la fórmula [2] se aplica el valor de I en microamperios, se obtiene el valor de R , directamente, en megohmios.

Al medir el aislamiento por este procedimiento, conviene hacer el primer tanteo con una tensión V muy pequeña, para evitar un corto circuito con todas sus consecuencias, en el caso de que el aislamiento fuese muy pequeño.

CAPÍTULO II

ELEVACIÓN DE TEMPERATURAS

Temperaturas. — El ensayo de temperaturas es la prueba más fácil de efectuar y a la vez una de las que mejor idea dan de la calidad de la máquina eléctrica ensayada.

Es fácil de efectuar, porque para ello no se necesitan más aparatos que un par de termómetros, que siempre se tienen a mano, y cuyo manejo está al alcance de toda persona un poco culta.

Esta prueba da idea de la calidad de una máquina, porque el aumento de temperatura que ésta sufre depende de las pérdidas que tenga y de sus condiciones de ventilación; de modo que cuando una máquina eléctrica se calienta poco, es seguro que tiene pocas pérdidas y, por lo tanto, buen rendimiento, o está muy bien ventilada.

Si una máquina funciona a baja temperatura, sus aislantes no corren peligro de quemarse, y no es probable que se formen contactos con la masa, ni entre espiras, pudiendo augurarle larga vida.

En toda máquina eléctrica, una parte de la energía que se recibe es absorbida por las resistencias

pasivas de la misma, de modo que la energía que da es siempre menor que la recibida por ella. La diferencia entre una y otra es la pérdida de la máquina.

La energía perdida se transforma en calor y hace aumentar la temperatura de los devanados, calentando toda la máquina.

Siempre que un cuerpo caliente está en contacto con el aire, pierde gran parte de su calor en calentarlo para igualar las temperaturas; la pérdida de calor es mayor cuanto más grande es la diferencia de grados entre el cuerpo caliente y el aire, y más agitado esté éste.

Ahora bien, toda máquina eléctrica al funcionar, tiende a aumentar su temperatura, debido al calor que le comunica la energía perdida en su seno; y como por otra parte, cuanto mayor es su temperatura, más grande es la cantidad de calor que pierde por contacto del aire, forzosamente llega un momento en que el calor perdido por ventilación se hace igual al que le comunica la energía perdida. Cuando llega este caso, la temperatura de la máquina permanece constante, y entonces se dice que ha adquirido su *temperatura de régimen*.

Más interesante que la temperatura de régimen, es conocer el aumento de la misma sobre el ambiente, puesto que éste puede suponerse constante, mientras la temperatura de régimen varía según la estación y el local donde funciona la máquina, puesto que cuanto más baja sea la temperatura del aire y más agitado esté, menor será la temperatura de régimen alcanzada por la máquina.

Para tener el aumento de temperatura de una máquina basta restar de la temperatura de régimen la del local. Esta se medirá con un termómetro cualquiera, colocado no muy cerca de la máquina, para evitar que sea influido por las corrientes de aire caliente que salen de la misma, y procurando que no esté cerca de una puerta exterior, para que no influyan en él las corrientes de aire frío que entran en la habitación.

Una máquina se acepta como buena cuando el aumento de temperatura no pasa de 50° en los devanados y de 60° en el colector. Si la máquina es de tipo acorazado, o su servicio es intermitente, puede tolerarse un aumento de 60° en aquéllos y de 80° en éste.

Termómetros empleados y modo de manejarlos.—

Para medir la temperatura de una máquina, deben emplearse termómetros de los llamados para líquidos, sin marco de madera y con la graduación grabada en el tubo de cristal, cuya escala alcance los 100° y que tenga el depósito pequeño para que sean sensibles y pueda leerse rápidamente la temperatura de la máquina sin dar tiempo a que ésta se enfríe.

Cuando la medición se efectúa estando la máquina parada, los termómetros pueden ser indistintamente de mercurio o de alcohol; pero si la medición debe efectuarse en marcha, conviene emplearlos de alcohol, porque sometiendo el mercurio a la acción de un campo magnético de intensidad variable, se desarrollan en su masa corrientes de

Foucault que contribuyen a calentarlo, y hacen que la columna termométrica suba más de lo debido.

Siendo el vidrio mal conductor del calor, si se apoya directamente el depósito termométrico en la parte caliente, la transmisión de calor se produce lentamente dando tiempo a que se enfríe la máquina. A fin de que el calor se comuniqué rápidamente a la masa líquida del termómetro, se puede cubrir el depósito inferior de éste con papel de estaño; así, como el estaño es buen conductor del calor, se le comunica en seguida la temperatura de la máquina, y la transmisión del calor al líquido será más rápida, por haber aumentado la superficie de contacto.

Para evitar que el termómetro vaya enfriándose por contacto con el aire, debe cubrirse la parte superior del depósito, apoyado sobre la parte caliente de la máquina, con algodón en rama o hilas.

Cuando se toma la temperatura de un punto, debe procurarse que el termómetro apoyado en él permanezca fijo, pues cualquier movimiento de traslación que sufra hace enfriar su depósito termométrico y se necesita mucho más tiempo para tomar la temperatura.

Trazado de curvas de temperatura. — El calentamiento de una máquina eléctrica puede estudiarse gráficamente mediante el trazado de curvas especiales que relacionan los aumentos de temperatura con los tiempos empleados en alcanzarlos.

Estas curvas se trazan (fig. 3), tomando sobre la recta OA , magnitudes proporcionales a los

tiempos, y sobre OB , magnitudes correspondientes a los aumentos sufridos al final de cada tiempo. Para conocer estos aumentos se hace funcionar

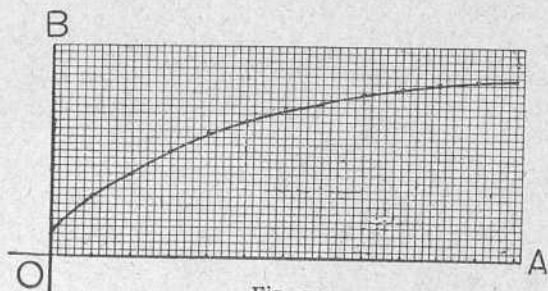


Fig 3

la máquina con la carga y velocidad normales, procurando que permanezcan lo más constantes posible, y periódicamente cada diez minutos, por ejemplo, se miden las temperaturas del estátor y del local, para buscar con ellas el aumento sufrido por el estátor y formar la tabla siguiente:

Tiempo en minutos	TEMPERATURAS EN GRADOS		
	Máquina	Local	Diferencia
0	15	12	3
10	20'5	12'5	8
20	24	12'8	11'2
30	27'2	13'2	14
40	30	13'5	16'5
50	31'5	13'5	18
60	33'5	13'8	19'7
70	34'5	14	20'5
80	35'5	14	21'5
90	36'5	14	22'5
100	37	14	23
110	37'5	14	23'5
120	37'5	14	23'5

Estas mediciones deben continuarse hasta que dos o tres lecturas consecutivas acusen la misma diferencia, que será cuando la máquina haya alcanzado la temperatura de régimen.

Para dibujar la curva, se toma un papel cuadrulado, como el de la figura 3, y se escogen escalas apropiadas para los tiempos y para los aumentos de temperatura. En la figura hemos escogido para los tiempos dos minutos por división, y para las temperaturas una división por grado. Después, sobre uno de los ejes, OA , se van tomando puntos cuyas distancias a O representen los tiempos anotados en la primera columna de la tabla anterior, y sobre la perpendicular de cada punto, y a partir del eje OA , se toman longitudes que representen las diferencias de temperatura anotadas en la última columna de la tabla precedente. La curva de temperaturas debe pasar por la cabeza de todas estas perpendiculares; bastará, pues, trazar, con una plantilla, una línea que pase por todas ellas y tendremos la curva deseada.

Después que la máquina ha alcanzado la temperatura de régimen, puede detenerse su marcha para poder tomar las temperaturas de sus órganos principales: inductores, inducido, colector, cojinetes, armaduras, etc., así se obtienen las temperaturas extremas de las curvas correspondientes a dichos órganos.

Si después de parada la máquina continuamos apoyando el termómetro en el mismo sitio que ocupaba, al tomar las temperaturas para el trazado de la curva en marcha, podremos observar

como va subiendo la columna termométrica durante algunos minutos, esto es debido: primero, a que estando la máquina en reposo, su contacto con el termómetro es más perfecto por no haber trepidaciones; y segundo, porque estando parada la máquina cesa su ventilación forzada y sus capas exteriores van adquiriendo la temperatura de las capas internas, que siempre están más calientes.

Cuando la máquina que se ensaya es de mucha potencia, y no es posible recuperar la energía de carga, puede adoptarse el siguiente método, con el cual se ahorra mucha energía, aunque se pierde más tiempo.

Se traza la curva de temperaturas, moviendo a máquina en corto circuito y con la velocidad normal. Después de enfriada la máquina, se traza otra curva de temperaturas marchando la máquina en circuito abierto con la tensión y la velocidad normales. Cuando se tienen las dos curvas se suman las ordenadas correspondientes a abscisas iguales (1), y la curva resultante da los aumentos de temperatura, con un error que en ningún caso excede de un dos por ciento.

Si no se quiere trazar la curva de temperaturas para saber cuando llega la máquina a la temperatura de régimen, se pueden medir las temperaturas de los distintos órganos de la máquina, después de cuatro horas de marcha a plena carga y con la

(1) Denominase *abscisa*, toda distancia tomada sobre el eje horizontal (*OA* de la figura 3) y a partir del punto *O*; y se entiende por *ordenada*, toda distancia tomada sobre el eje vertical, (*OB* de la figura 3).

velocidad normal; puesto que pasado este tiempo se considera que la máquina habrá alcanzado la temperatura de régimen, por defectuosa que sea su ventilación.

Medición de temperaturas por variación de resistencias. — La fórmula [1] de este mismo tomo, nos da un medio para calcular el aumento de temperatura, sin más que medir la resistencia a la temperatura ambiente y la resistencia en caliente.

La relación entre la resistencia ambiente R_t y la resistencia a cero grados R_o es

$$R_t = R_o(1 + at) = R_o + R_oat; \quad [3]$$

y la misma relación en caliente será

$$R'_t = R_o(1 + at') = R_o + R_oat'; \quad [4]$$

Restando la [3] de la [4], miembro a miembro, tendremos:

$$R'_t - R_t = R_oa(t' - t);$$

despejando de aquí el aumento de temperatura

$$t' - t = \frac{R'_t - R_t}{R_oa};$$

y substituyendo el valor de R_o deducido de la [3]

$$t' - t = \frac{R'_t - R_t}{R_t} \left(\frac{1}{a} + t \right);$$



resulta para $a = 0'004$,

$$t' - t = \frac{R'_t - R_t}{R_t} (250 + t). \quad [5]$$

Ejemplo. *¿Qué aumento de temperatura habrá sufrido el inductor de una máquina cuyas resistencias son: en frío 53 ohmios y en caliente 60, siendo la temperatura del local de 15 grados?*

Aplicando la fórmula [5] tendremos:

$$t' - t = \frac{60 - 53}{53} (250 + 15) = \frac{7}{53} \times 265 = 35^{\circ}$$

Si el aumento es de 35 grados, la temperatura alcanzada por el inductor deberá ser

$$t = 35^{\circ} + 15^{\circ} = 50^{\circ}$$

La elevación de temperatura medida por este método, resulta siempre mayor que la medida con el termómetro. Esto es debido a que con el termómetro se mide la temperatura de la capa exterior, que es la más fría, por estar mejor ventilada, mientras por el método de las resistencias se mide la temperatura media de todas las capas.



CAPÍTULO III

MEDIDA DE LA POTENCIA ÚTIL DE UN MOTOR

Procedimiento directo. — Para medir la potencia útil de un motor eléctrico pueden emplearse diferentes métodos, que son aplicables según el grupo a que pertenece el motor; entre estos métodos existe uno que puede aplicarse en general a todo generador mecánico y que vamos a detallar en este capítulo, antes de estudiar los métodos especiales que describiremos en capítulos sucesivos.

En todo movimiento de rotación existen dos pares de fuerza que son: uno, que origina el movimiento, y recibe el nombre de *par motor*; y otro, que se opone al movimiento, y se designa con el nombre de *par resistente*.

El par motor depende de la potencia que nace en el órgano movable, y el par resistente es proporcional a la potencia útil que el rotor suministra. Esta potencia se obtiene multiplicando el par resistente C' , por el número de revoluciones que el rotor da en un segundo n , y por la constante 2π ; la expresión de la potencia útil es

$$W_u = 2\pi n C' \quad [6]$$

Según esta fórmula podremos medir directamente la potencia útil de un motor, midiendo su velocidad y su par resistente.

Medición de velocidad. — El número de revoluciones de un motor se mide mediante aparatos especiales conocidos con el nombre de cuenta-revoluciones y de tacómetros. Todos ellos tienen un eje acabado en punta triédrica o cónica, que al ser aplicado al punto de centro del eje motor es arrastrado por él transmitiendo su movimiento al sistema registrador, el cual puede ser de integración continua o de integración instantánea, según se trate de un contador de revoluciones o de un tacómetro.

El registrador de un cuentarrevoluciones puede ser de ruedas dentadas con la cara graduada a modo de limbo o de ruedas con cifras saltadoras.

El contador de ruedas dentadas con limbo graduado tiene en el eje de transmisión un tornillo sin fin, de una sola vuelta, que engrana con la primera rueda de un sistema de engranaje formado por ruedas de cien dientes y piñones de diez. Cada rueda tiene los dientes numerados de diez en diez y se mueven por debajo de unos índices fijos montados en la armazón del aparato, para que resulte fácil la lectura del número de vueltas girado por el eje del cuentarrevoluciones.

La rueda que engrana con el tornillo sin fin, avanza un diente en cada vuelta del eje, mientras la rueda movida por el piñón de ésta necesita diez revoluciones para adelantar un diente y la tercera

rueda, movida por el piñón de la segunda, cien revoluciones para lo mismo. Dispuestas las ruedas graduadas de este modo, las divisiones de la primera rueda corresponden a las decenas; las de la segunda, a las centenas; las de la tercera, a los miles, y así sucesivamente si el contador tiene más ruedas.

Si antes de aplicar el cuentarrevoluciones al eje del motor se han puesto todas las ruedas con el cero bajo su índice, el número leído después de la operación representa las revoluciones dadas por el motor en el tiempo que ha estado funcionando el contador, y si el aparato no estaba en el cero antes de aplicarlo al eje del motor, se buscan las revoluciones de éste por diferencia entre las lecturas final e inicial.

El número de revoluciones que el motor da en un segundo, para aplicarlo a la fórmula [6], se sabrá midiendo el tiempo que dura el movimiento del contador de revoluciones y dividiendo sus indicaciones por el tiempo.

El contador de cifras saltadoras consta de cuatro ruedas de dientes interiores, y con la superficie cilíndrica exterior provista de las diez cifras de los números dígitos en su orden natural. Cada rueda, excepto la última, tiene un piñón de diez dientes que engrana con la rueda siguiente y la primera rueda engrana con un piñón montado en el eje de transmisión. El conjunto de las ruedas de cifras saltadoras va encerrado en una cajita que presenta una fila de ventanas, en una de sus caras, de tantas aberturas como ruedas tiene el contador y por las

cuales van asomando las cifras que forman el número indicador de las revoluciones comunicadas al contador, que se lee empezando por el lado opuesto al eje de transmisión.

Lo mismo que con el contador de ruedas y limbo graduado, es necesario medir el tiempo que este contador está embragado al motor para deducir las revoluciones que éste da por segundo. Este requisito no sólo obliga a emplear dos aparatos para la medición, sino que ocupa en la misma a dos operadores, uno para el contador de revoluciones y otro para el cronómetro contador de tiempo, los cuales han de ponerse en sincronismo para la marcha simultánea de sus aparatos a fin de no cometer errores de medición difíciles de evitar.

Para poder medir las revoluciones con un solo aparato y un solo operador, se han ideado los cuentarrevoluciones cronométricos, entre los cuales vamos a citar, como más perfeccionado, el de Hasler.

Este aparato tiene dos ruedas dentadas que engranan entre sí con una reducción de diez, de modo que mientras la una da diez vueltas, la otra da una sola. Los ejes de las dos ruedas atraviesan una esfera común y llevan una saeta que recorren dos círculos, como los de reloj, graduado el uno con mil divisiones y el otro con diez. El primero corresponde a la primera rueda y el otro a la segunda.

El eje de transmisión tiene un tornillo sin fin para engranar con la primera rueda, pero su embrague no es constante y se establece por un mecanismo combinado con un cronómetro que lleva

el mismo aparato. Al poner en marcha el cronómetro, y estando el eje de transmisión arrastrado por el eje del motor, se produce el embrague y las saetas del contador van registrando las revoluciones del eje hasta que el cronómetro se para. La marcha de éste dura tres segundos y las escalas del contador están preparadas para que en este tiempo marquen las revoluciones por minuto del motor. Cada vuelta de la primera saeta equivale a mil revoluciones y una vuelta de la segunda a diez vueltas de la primera, de manera que el contador Hasler permite medir desde una a 10000 revoluciones por minuto.

El contador Hasler mide las revoluciones en tres segundos de tiempo, con lo cual no da lugar a que se caliente la punta de transmisión, evitando que patine y pierda revoluciones; además, no empieza a registrar las revoluciones hasta que se dispara el cronómetro para eliminar la pérdida de vueltas que siempre se produce en el momento de iniciar el contacto con el eje del motor.

Los tacómetros son aparatos registradores de acción instantánea y lectura directa. Estos aparatos pueden estar destinados a ser aplicados al eje del motor sólo en el momento de efectuar la medición, o pueden ir unidos directamente a la misma máquina, para que indiquen su velocidad continuamente. Según el objeto que han de cumplir tienen una construcción apropiada.

Los tacómetros del primer tipo suelen tener varias sensibilidades, pues se construyen para poder medir las revoluciones de cualquiera máquina, y

conviene que puedan registrar velocidades muy distintas.

Los tacómetros del segundo tipo están destinados a funcionar siempre en la misma máquina, y se construyen con una sola escala apropiada a las revoluciones de la máquina a que se destinan.



Fig. 4

Las figuras 4 y 5 representan dos tacómetros pertenecientes al primer grupo; y la figura 7 pertenece a un tacómetro del segundo grupo.

El tacómetro de la figura 4 es de gran tamaño y tiene en su parte central la aguja indicadora y la esfera graduada con tres escalas distintas que son: una de 75 a 500, otra de 150 a 1000 y la tercera de 300 a 2000 revoluciones. Este aparato tiene tres ejes, uno para cada escala, y están señalados con los números 500, 1000 y 2000, para indicar la escala a que pertenecen. Dichos ejes pueden empalmar, por un sistema de bayoneta, con un eje terminado en punta triédrica; en la figura viene empalmado con el eje central y está indicado su empalme con los ejes extremos por líneas de puntos. El aparato está provisto de un puño que sirve para poderlo sostener a mano.

Para operar con este tacómetro, se introduce la punta triédrica de su eje en el punto de torno situado en el extremo del eje de la máquina y se sostiene el aparato a presión moderada para que no patine, procurando que su eje se mantenga bien horizontal y a continuación del de la máquina, cuyas revoluciones se transmitirán así directamente al aparato.

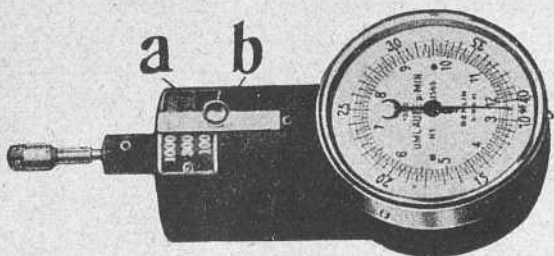


Fig. 5

Interiormente, tiene un sistema de engranajes que ponen en movimiento un aparato de bolas semejante al regulador de Wat, y este mecanismo es el que produce la desviación de la aguja indicadora.

Mucho más ligero y reducido es el tacómetro representado en la figura 5. No necesita puño para sostenerlo, como requería el anterior, pues cabe perfectamente en la palma de la mano y en ella se sostiene. Su esfera sólo tiene dos graduaciones para las tres sensibilidades de que dispone el aparato; una graduación va de 10 a 40, pudiéndose multiplicar por 10 ó por 100, según la escala que

se emplee; y la otra va de 3 a 12, debiéndose multiplicar por 100. Las tres sensibilidades del aparato son: de 100 a 400, de 300 a 1200 y de 1000 a 4000 revoluciones; todas ellas están marcadas en la plaquita *a*.

Para variar la sensibilidad del tacómetro, basta hacer correr en sentido del eje la tira metálica, situada en el centro de la plaquita *a*, operación que se efectúa empujando el botón *b*. La tira metálica tiene una raya que sirve de línea de fe, para saber a qué sensibilidad está el aparato. En la figura está indicando la sensibilidad de 1000 a 4000

El aparato tiene un solo eje, en el que se enchufa una cabeza que puede terminar en tapón de goma, como en la figura 5, o en punta de acero triédrica como la de la figura 4. Dispone además este aparato de una cabeza en forma de polea para poderla enchufar cuando convenga medir las revoluciones de un eje que no tenga los extremos libres. En este caso se efectúa la transmisión con un hilo sin fin, que abraza el eje de la máquina y pase por la garganta de la polea del tacómetro.

Estos tacómetros *miden las revoluciones por minuto* y para poderlas aplicar a la fórmula [6] *será indispensable dividir las por 60*.

La casa Siemens Halske construye unos tacómetros, no rotatorios, que tienen por fundamento un fenómeno de resonancia. Su aspecto y construcción se parecen al del frecuencímetro Grahm descrito en el tomo XVIII.

Interiormente contienen una serie de lengüetas

de acero de dimensiones variadas (fig. 6), de manera que cada una tenga distinto período propio de vibración. Estos períodos se hacen iguales al correspondiente a la velocidad que han de registrar.

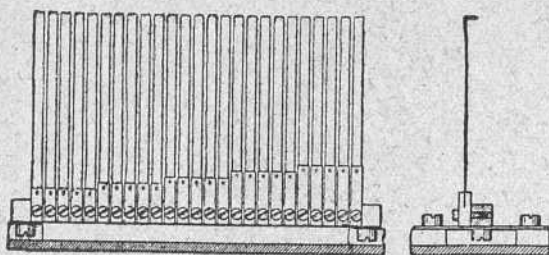


Fig. 6

Estas lenguetas, representadas de canto a la derecha de la figura 6, llevan en su extremo libre un apéndice perpendicular a su longitud, pintado de blanco en su parte superior, que es lo único que se ve de ellas por la parte exterior del aparato.

En la figura 7, que representa uno de estos tacómetros, se ve una serie de dichos apéndices, formando una línea de cuadritos blancos sobre fondo negro para que resulten más visibles.

El aparato está sostenido por un brazo bastante largo para que las vibraciones que recibe en su parte inferior, se transmitan muy ampliadas en la base del tacómetro. Dicho brazo se atornilla en la peana de la máquina cuyas revoluciones debe registrar (fig. 8).

Al girar la máquina, se producen ciertas vibraciones, que se propagan por toda la masa de ella y del tacómetro unido a la misma. El número de

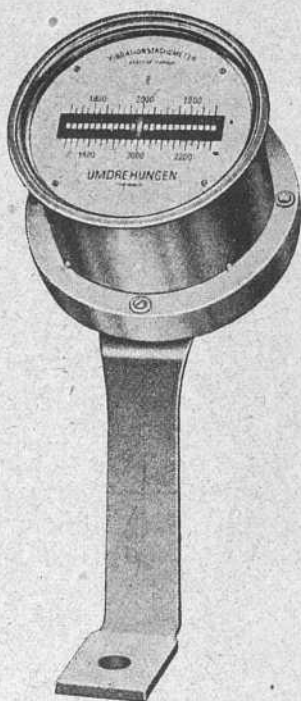


Fig. 7

vibraciones que tiene la máquina depende del número de revoluciones de su eje, y es mayor cuanto más aprisa gira la máquina. Estas vibraciones tienden a comunicarse por todas las lengüetas;

pero sólo lo consiguen de un modo notable en aquella cuyo período de vibración corresponde a la velocidad de la máquina.

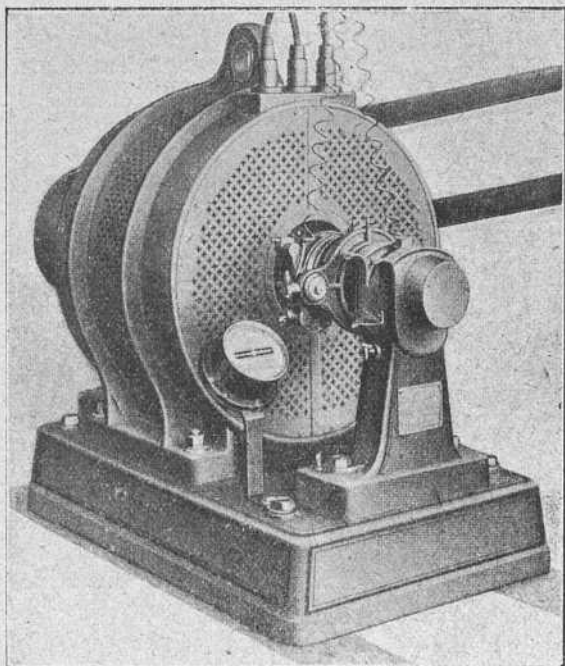


Fig. 8

El apéndice de la lengüeta vibradora produce un ensanchamiento en la línea de cuadritos blancos, que le hace muy visible. En la figura 7 aparece vibrando la lengüeta correspondiente a las 2000 revoluciones.

Cuando el aparato funciona, a veces se nota vibración en dos o tres lengüetas consecutivas, pero las revoluciones deben entenderse que corresponden a la de máxima vibración.

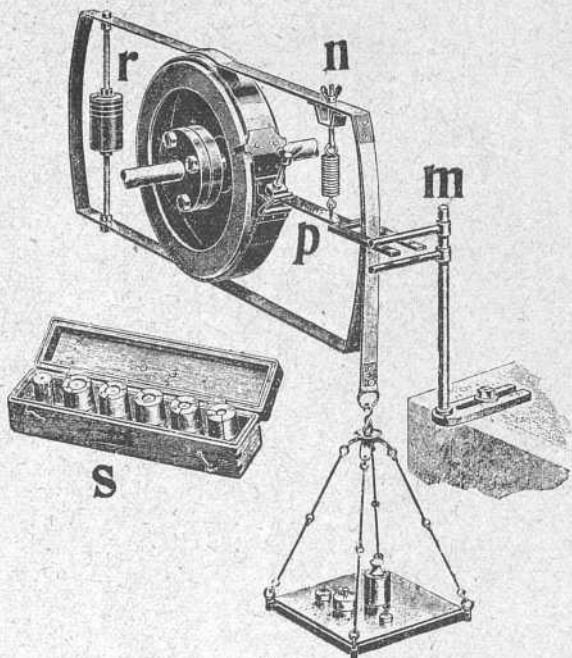


Fig. 9

Medición del par resistente. — El procedimiento más generalizado para la medición del par resistente de un generador de energía mecánica, es el del freno dinamométrico o dinamómetro de fricción.

La figura 9 representa un dinamómetro de fricción muy perfeccionado. Consta de un volante o

polea con la superficie de su llanta perfectamente lisa, para que el coeficiente de rozamiento sea pequeño. Esta llanta va envuelta por una tira de acero unido por dos puntos diametrales a un marco del mismo metal, formado por dos ramas horizontales rectas y dos ramas laterales arqueadas, con centro en el eje del rotor. El cinturón termina, por un extremo, en una regla p que acaba en forma de U y abraza una de las ramas arqueadas del marco para introducirse en medio de dos barillas horizontales que forman parte del pie m ; en el otro extremo del cinturón se encuentra un eslabón abierto que se apoya en la regla terminal del anterior extremo para cerrar el anillo.

La tuerca n , sirve para atirantar un muelle helicoidal, que hace juntar los extremos del cinturón y así aumenta la presión del mismo.

De uno de los bordes del marco, arranca una cinta de metal, de cuyo extremo pende un platillo de balanza para cargar en él pesos calibrados. Por el lado opuesto, tiene un contrapeso r , que equilibra el peso de la palanca p y del platillo descargado.

El volante del freno se embraga al eje del motor, cuyo par se desea medir, y para poderlo ajustar a distintos ejes, acompañan al aparato seis conos de recambio guardados en una cajita s .

La llanta del volante, en su parte interior, tiene forma de canal, para que ofrezca mayor superficie de enfriamiento; y cuando se quiere que la temperatura del freno no llegue a ser peligrosa, puede mantenerse por el canal una circulación de agua.

Cuando el motor está en reposo y el platillo sin peso, la regla p debe permanecer horizontal, y si la horizontalidad no es perfecta, se corrige variando el contrapeso r . La varilla horizontal inferior del pie m , evita que el freno caiga cuando el platillo está cargado y el motor en reposo.

Al girar el eje del motor hacia la izquierda, arrastra el freno y levanta el platillo hasta que la regla p choca con la varilla superior del pie m , y queda detenido el movimiento del freno, mientras el volante va deslizándose por la superficie interior del cinturón y consumiendo por rozamiento la potencia disponible del motor. Puede restablecerse la horizontalidad de la regla p , colocando pesos en el platillo del freno hasta que equilibren el efecto del rozamiento. Conseguido el equilibrio, encontraremos el valor del *par resistente* C' , de la fórmula [6], *multiplicando los pesos del platillo en kilos, por el brazo de palanca que lo sostiene, medido en metros.*

Conocido el par resistente encontraremos la potencia útil aplicando la fórmula [6]

$$W_u = 2\pi nC' = 6'28nC'$$

El valor de la potencia útil vendrá dado en kilogrametros, y si nos conviene tenerla *en caballos*, bastará *dividir el resultado obtenido por 75*; en cambio, si deseamos tener la potencia *en vatios*, deberemos *multiplicar dicho resultado por 9'8*.

EJEMPLO. *¿Cuál es la potencia útil de un motor que equilibra un freno electrodinamométrico de 8 dm.*

de palanca con un peso de 1500 gr., marchando a 900 revoluciones por minuto?

El par resistente será

$$C' = 0.8 \times 1500 = 1.2 \text{ kg.}$$

El número de revoluciones por segundo resulta

$$n = \frac{900}{60} = 15$$

La potencia útil en kilográmetros, será:

$$W_u = 6.28 \times 15 \times 1.2 = 113 \text{ kgm.}$$

en caballos; sería

$$W_u = \frac{113}{75} = 1.5 \text{ HP}$$

y la misma potencia en vatios, resultaría

$$W_u = 113 \times 9.8 = 1107.4 \text{ vatios}$$

Cuando se utiliza siempre el mismo freno, la longitud del brazo de palanca L , es constante y su valor puede agruparse a las demás constantes de la fórmula [6] para formar un coeficiente práctico que se emplea como factor del número de revoluciones, n , y del peso, P , de equilibrio del freno, para buscar la potencia útil. Con esta modificación la fórmula [6] queda reducida así:

$$W_u = KnP$$

Siendo el coeficiente K , según se d see el resultado,

en kilográmetros, $\frac{2\pi L}{60}$

en caballos, $\frac{2\pi L}{60 \times 75}$

en vatios, $\frac{2\pi \times 9'8 I}{60}$

Debiendo tomar el valor de n , por minuto, y el de P , en kilos.

En el freno representado en la figura 9, para que la palanca que sostiene el platillo tenga una longitud constante, independientemente de la inclinación del mismo, se ha hecho pender el platillo

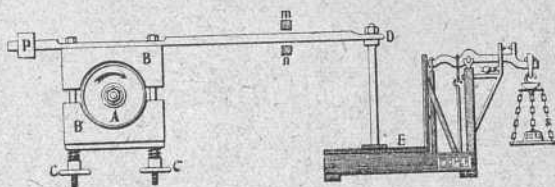


Fig. 10

de una cinta que se apoya tangencialmente en la rama arqueada del marco de acero, rama cuyo arco tiene el mismo centro que el eje del motor; así la distancia del eje a la vertical de suspensión del platillo será, en todas posiciones, igual al radio del arco.

Para aumentar la carga del motor, se atornilla la tuerca n (fig. 9), con lo cual aumenta la presión del freno y con ella sus rozamientos. El freno se desviará y para restablecer el equilibrio, debere-

mos añadir pesos al platillo, con los cuales tendremos otro par resistente correspondiente a la nueva carga del motor.

El freno descrito puede aprovecharse para medir el par resistente de motores cuya potencia no excede de 10 HP; pero para potencias superiores deben emplearse frenos más potentes, que tienen distinta forma, aunque el mismo fundamento.

En la figura 10, está representado un freno dinamométrico para grandes potencias. La polea *A* está abrazada por dos zapatas de madera *B* y *B'* cuya presión se regula mediante los volantes *C* y *C'*. La zapata superior está unida a la palanca *PD* de cuyo extremo parte un pie que se apoya en la plataforma de una báscula *E*.

Al girar la polea, en el sentido de la flecha, se produce una presión sobre la plataforma de la báscula, que puede ser fácilmente equilibrada y medida.

El contrapeso *P* tiene por objeto equilibrar la palanca, para que la vertical de su centro de gravedad pase por el eje de rotación. Se comprueba el equilibrio de la palanca, en que no debe producir presión alguna sobre la báscula cuando el motor permanece en reposo; y se regula el equilibrio corriendo el contrapeso *P* hasta que la báscula no acuse peso alguno.

Ciertos constructores suprimen el contrapeso *P* para que el freno sea más ligero; pero en este caso la palanca tiene su centro de gravedad fuera de la vertical que pasa por el eje de la polea, y a la presión medida en la báscula estando el motor en mar-

cha, debe restársele la presión registrada cuando el motor está en reposo.

Los topes m y n , sirven para evitar la rotación del freno.

La zapata B presenta un agujero, en su parte central superior, para poder lubricar la polea A , y a fin de facilitar la circulación del lubricante, las superficies interiores de las dos zapatas están surcadas. El lubricante empleado es una mezcla de agua y jabón, que sirve para mantener la polea a moderada temperatura.

Algunas veces, cuando se trata de motores de gran velocidad, para no tener un calentamiento exagerado en las zapatas del freno, su polea no se instala en el mismo eje del motor, sino que se monta en un eje aparte, sostenido por dos cojinetes, y provisto de otra polea de gran diámetro que se utiliza para recibir la energía del motor transmitida por una correa sin fin. Dicho eje puede marchar a pocas revoluciones, si su polea es grande y la del motor muy pequeña, y así resulta más fácil mantener el freno a una temperatura moderada.

Parecido al dinamómetro de fricción, se construye el dinamómetro magnético. Difieren en que este último tiene un disco de cobre de gran diámetro en lugar de la polea que lleva el primero, y las zapatas del freno de fricción están substituídas por un par de potentes imanes permanentes, situados uno a cada cara del disco, y unidos a una palanca de cuyo extremo pende el platillo de balanza para el equilibrio.

El disco de cobre montado sobre el eje del motor, gira en el seno del campo magnético producido por los imanes permanentes y en él se desarrollan corrientes de Foucault que, atrayendo las líneas de fuerza del campo magnético, obligan a los imanes a girar sobre su eje desviando la palanca que sostiene el platillo cuyos pesos deben restablecer la horizontalidad del freno.

Para aumentar la carga del motor con el freno magnético, se aproximan los polos de los imanes permanentes, con lo cual disminuye el entrehierro y aumenta la intensidad del campo magnético, lo mismo que las corrientes de Foucault inducidas en el disco y su atracción sobre los imanes.



CAPÍTULO IV

PRUEBAS DE MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Características. — Las condiciones de funcionamiento de toda máquina eléctrica, pueden ser estudiadas mediante gráficos que reciben el nombre de características.

En el estudio de las máquinas de corriente continua las características más notables son:

La característica en vacío.

La » externa.

La » de velocidad.

La » de rendimiento.

Característica en vacío. — Esta característica, conocida también con el nombre de característica interna, es la curva que relaciona las variaciones de la fuerza electromotriz E , con las de la corriente i del inductor. Para buscar experimentalmente los puntos de esta curva, se hace funcionar la máquina como dínamo, en circuito abierto, velocidad constante y excitación separada.

El esquema de funcionamiento debe ser tal como se representa en la figura II. La corriente de

un generador auxiliar G , se manda al inductor CD puesto en serie con un reóstato regulador st y un amperímetro I , y de los bornes A y B de la máquina se deriva un voltímetro V .

En el amperímetro I , se lee la corriente inductora i , y en el voltímetro V , la diferencia de tensión entre escobillas, que, funcionando la máquina

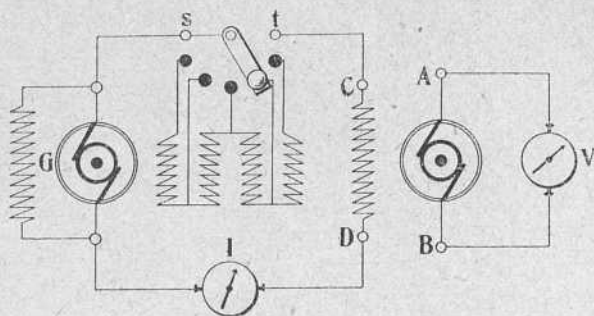


Fig. 11

en circuito abierto, será igual a la fuerza electromotriz, ya que la tensión disponible es siempre igual a la fuerza electromotriz menos la caída interior, y marchando el generador sin corriente su caída debe ser nula.

El valor de la corriente inductora leída en I , y el correspondiente de la fuerza electromotriz, medido en V , nos dan un punto de la curva, que podemos anotar para proceder luego al trazado de la característica.

Mediante el reóstato st , se puede variar la corriente inductora y las nuevas indicaciones de I y

de V , darán otro punto de la curva, y repitiendo la operación se podrá obtener todos los puntos que convengan para el trazado de la curva.

Como ejemplo, vamos a incluir los datos que para el trazado de la característica en vacío hemos tomado de una dínamo Siemens Schuckert, tipo G M 84, existente en nuestro laboratorio, y cuyas constantes son: tensión, 220 voltios; corriente, 17 amperios; velocidad, 1480 revoluciones.

<u>Amperios de excitación</u>	<u>Voltios inducidos</u>
2'00	264
1'88	260
1'76	256
1'65	252
1'49	242
1'32	230
1'21	222
1'13	214
1'07	208
0'90	190
0'78	174
0'68	162
0'62	150
0'50	128
0'00	38

Para dibujar la curva, se toma un papel cuadriculado (fig. 12), y en él dos ejes rectangulares AO y BO ; sobre el primero, que tomaremos como eje de corrientes, se van tomando puntos cuyas distancias al origen O equivalgan a los amperios

anotados en la tabla anterior, y sobre las verticales que pasan por dichos puntos se toman otros puntos que estén separados del eje AO distancias

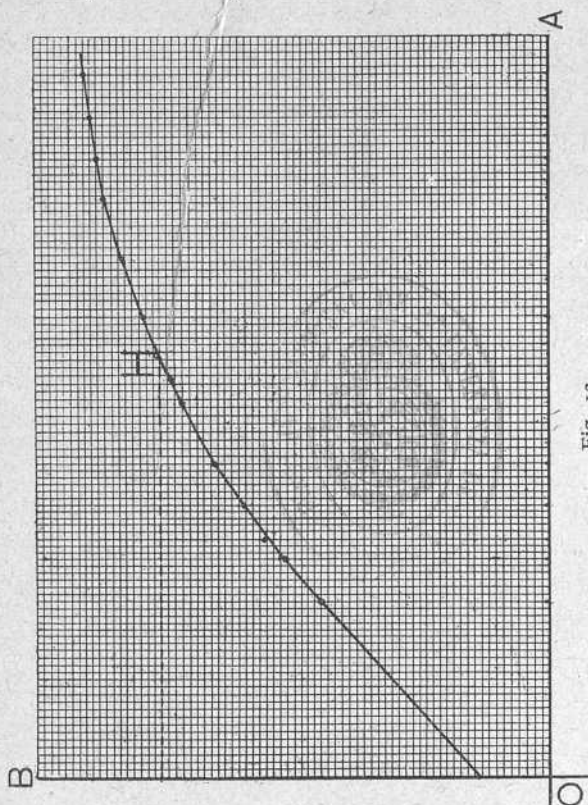


Fig. 12

proporcionales a los valores de los voltios inducidos por la corriente correspondiente, anotados en la tabla anterior. Estos últimos puntos se unen por

medio de una línea de trazo continuo, que es la característica deseada.

Generalmente ocurre que algunos puntos caen fuera de la curva trazada; pero estos puntos, que no siguen la misma orientación de los demás, corresponden a mediciones tomadas erróneamente al efectuar las lecturas en los aparatos, que nunca son de bastante precisión.

Las escalas para los amperios y los voltios se toman arbitrariamente. En la figura 12 hemos tomado para la corriente 50 divisiones por amperio, y para la tensión, cuatro voltios por división.

Esta característica es la curva de imantación, semejante a la estudiada en el tomo I, figura 8, de esta Biblioteca, y como allí, tendrá esta curva dos ramas, una correspondiente a los valores crecientes de i , y otra debida a los mismos valores decrecientes. A fin de que los puntos tomados experimentalmente pertenezcan a una misma rama de la curva debe procurarse, al variar la resistencia st , *mover la palanca del reóstato siempre en el mismo sentido*, así los valores de i , serán siempre crecientes, o siempre decrecientes.

Si se traza la característica en vacío empezando por una corriente nula y acabando por una corriente máxima, y después se repite el trazado operando al revés, resulta que los valores de la fuerza electromotriz dados por la última característica son superiores a los obtenidos en la primera; para tener el valor aproximado de la fuerza electromotriz podríamos tomar la media aritmética de las dos. Las casas constructoras acostumbran a trazar

la característica superior por ser la más favorable, y entonces la curva corta al eje BO muy lejos del punto O . La distancia entre el origen y la curva, representa la tensión debida al magnetismo remanente; en la figura 12, esta tensión equivale a 38 voltios.

Trazada la característica en vacío, puede estudiarse sobre ella, si la máquina correspondiente trabaja más o menos saturada, y si podrá sostener la tensión de servicio cuando aumente su carga.

Para saber si el circuito magnético de la máquina está saturado, basta tomar sobre el eje BO una distancia al origen equivalente a la tensión normal, en la figura 12 (teniendo en cuenta que cada división equivale a cuatro voltios y que la tensión normal de la máquina es de 220 voltios), deberemos tomar 55 divisiones; a partir de este punto, se sigue paralelamente al eje AO hasta encontrar la curva en un punto H ; si este punto está cerca del codo de la curva, la máquina funciona casi saturada y no habrá manera de sostener la tensión normal cuando la máquina funcione sobrecargada. En cambio, si el punto H se encuentra lejos del codo, será posible aumentar la fuerza electromotriz, a medida que vaya subiendo la carga de la máquina, para así poder compensar la caída interior y hacer que la tensión de servicio permanezca constante.

Si la máquina que se estudia tiene el inductor en derivación, encontraremos la resistencia de este circuito para el funcionamiento en vacío, partiendo la tensión normal por el valor de la corriente inductora en el punto H de la curva. En el ejemplo

que estamos estudiando (fig. 12), esta corriente vale 1'18 amperios, y la resistencia del circuito inductor cuando la máquina está funcionando en vacío y a la tensión normal, deberá ser

$$R = \frac{V}{i} = \frac{220}{1'18} = 186'4 \text{ ohmios}$$

Como los carretes del inductor derivado presentan sólo una resistencia de 105 ohmios, la diferencia entre esta resistencia y la dada por la fórmula, deberá añadirse al circuito inductor en forma de reóstato regulador de excitación. Así, la máquina de referencia debe tener un reóstato de 81'4 ohmios.

Cuando el reóstato de excitación esté suprimido circulará por el inductor, sometido a la tensión normal, una corriente máxima

$$i = \frac{220}{105} = 2'08 \text{ amperios}$$

y para esta corriente de excitación, la fuerza electromotriz de la máquina, según la figura 12, es de 267 voltios; ésta será la mayor fuerza electromotriz que podrá producir la máquina, dejando disponible la tensión normal de 220 voltios. La diferencia de 47 voltios es la mayor caída interior que podemos tener manteniendo la tensión de servicio. Es natural que cuanto mayor sea esta diferencia, más sobrecarga podrá soportar la máquina, sin disminuir la tensión normal.

La característica trazada en la figura 12, ha sido

determinada manteniendo constante la velocidad a 1480 revoluciones. Si altera la velocidad, variará la fuerza electromotriz inducida, según demuestra la fórmula

$$E = nN\mathcal{F} \quad [7]$$

en la que n representa el número de revoluciones por segundo; N , el número de conductores inducidos; E , la fuerza electromotriz; y \mathcal{F} el valor del flujo inductor. De manera que, siendo constante N y manteniendo la misma corriente de excitación para que \mathcal{F} permanezca constante, al variar n por n' tendremos otra fuerza electromotriz E' , que cumplirá la relación

$$E' = n'N\mathcal{F} \quad [8]$$

y la característica en vacío correspondiente a la nueva velocidad n' tendrá, para los mismos valores de la corriente inductora, ordenadas diferentes.

Al variar la velocidad en una dínamo, se puede aprovechar, como característica en vacío, la misma curva trazada con velocidad distinta sin más que cambiar la escala de las tensiones, conservando la misma escala de corrientes. En efecto, si dividimos la relación [7] por la [8] resulta la proporción

$$\frac{E}{E'} = \frac{n}{n'} \quad [9]$$

según la cual, las fuerzas electromotrices son directamente proporcionales a las revoluciones de la máquina, suponiendo constante el flujo inductor y el número de conductores inducidos.

Lo mismo que las fuerzas electromotrices serán sus escalas, y al querer aplicar a distinta velocidad una característica en vacío, encontraremos la nueva escala formando proporción entre escalas y revoluciones.

$$\frac{\text{Escala primera}}{\text{Escala segunda}} = \frac{\text{revoluciones primeras}}{\text{revoluciones segundas}}$$

y resolviendo esta proporción respecto al término desconocido podremos hallar su valor.

EJEMPLO. *En la misma dinamo, cuya característica en vacío a 1480 revoluciones viene representada en la figura 12, se desea saber qué característica en vacío tendría si su velocidad fuese de 1110 revoluciones.*

En la figura 12 cada división del eje *BO* representa cuatro voltios, y encontraremos la nueva escala resolviendo la proporción

$$\frac{4}{x} = \frac{1480}{1110}$$

de donde

$$x = \frac{4 \times 1110}{1480} = 3$$

luego cada división representará tres voltios.

La tabla de corrientes inductoras y tensiones inducidas será ahora la siguiente:

<u>Amperios de excitación</u>	<u>Voltios inducidos</u>
2'00	198'0
1'88	195'0
1'76	192'0
1'65	189'0
1'49	181'5
1'32	172'5
1'21	166'5
1'13	160'5
1'07	156 0
0'90	142'5
0'78	130'5
0'68	121'5
0'62	112'5
0'50	96'0
0'00	28'5

Característica interna de un motor. — La característica interna de un motor se puede determinar haciendo funcionar la máquina como si fuese dínamo, y procediendo en todo igual que para trazar la característica en vacío de las dinamos.

Otro método puede seguirse, que consiste en mover la máquina como motor sin carga a la velocidad normal mediante corriente suministrada por una dínamo de tensión ampliamente regulable.

Un amperímetro intercalado en el circuito inductor mide la corriente de excitación del motor y un voltímetro derivado en sus escobillas mide la tensión aplicada.

Variando la corriente inductora del motor se altera su velocidad y se consigue volverla a norma-

lizar modificando la tensión aplicada al rotor; conseguido esto, puede medirse la corriente inductora y la tensión aplicada, para tener un punto de la característica en vacío. Repitiendo la operación podrán tomarse todos los puntos que convengan para trazar la característica en vacío del motor.

Característica de velocidad para un motor sin carga. — La velocidad de un motor de corriente continua varía en sentido contrario al de la variación de su corriente inductora, suponiendo constante la tensión alimentadora del rotor. El gráfico que relaciona dichas variaciones es la llamada característica de velocidades en vacío.

Para su determinación experimental basta intercalar en el circuito inductor un reóstato y un amperímetro, con que poder variar y medir la corriente de excitación, cuyos valores y los de la velocidad, medida con un tacómetro, formarán la tabla de datos para dibujar la curva.

Cuando se tiene trazada la característica interna del motor, se pueden determinar por cálculo los puntos de la curva de velocidades en vacío, aplicando la fórmula [9]

$$\frac{E}{E'} = \frac{n}{n'}$$

Si representamos por n la velocidad adoptada al trazar la característica interna, sobre esta curva encontraremos el valor de E para cualquier corriente de excitación, E' puede representar la tensión normal aplicada al motor; y la resolución

de la proporción nos dará el valor de n' correspondiente a la misma corriente inductora empleada para buscar E .

Características de tensión y velocidad. — Así como la característica en vacío era el gráfico que relacionaba las variaciones de la tensión inducida y de la corriente inductora cuando permanecía constante la velocidad de la máquina; las características de tensión y velocidad, *son gráficos que relacionan las variaciones de la tensión y de la velocidad al permanecer constante la corriente inductora.*

Para su determinación experimental adoptaríamos el mismo esquema de la figura II; y en él procuraríamos mantener constante la corriente del inductor CD , vigilando las indicaciones del amperímetro I y regulando con el reóstato st . Al mismo tiempo haríamos variar la velocidad de la máquina y mediríamos simultáneamente sus revoluciones por medio de un tacómetro, y la tensión inducida con el voltímetro V .

Las características de tensión y velocidad pueden determinarse por procedimiento indirecto, cuando de la máquina en estudio se tiene trazada la característica en vacío. En efecto, mediante la proporción [9], es fácil determinar los diversos valores de la fuerza electromotriz inducida, por una misma corriente inductora, en las distintas velocidades que puede tener la máquina.

Como los gráficos que resultan al trazar las características de tensión y velocidad (fig. 13), son sencillamente líneas rectas (que deben pasar por

el origen O de los ejes, ya que forzosamente cualquiera que sea la corriente inductora al estar la máquina en reposo no producirá voltios), bastará buscar un punto fuera del origen para cada característica, y podremos dibujar los gráficos.

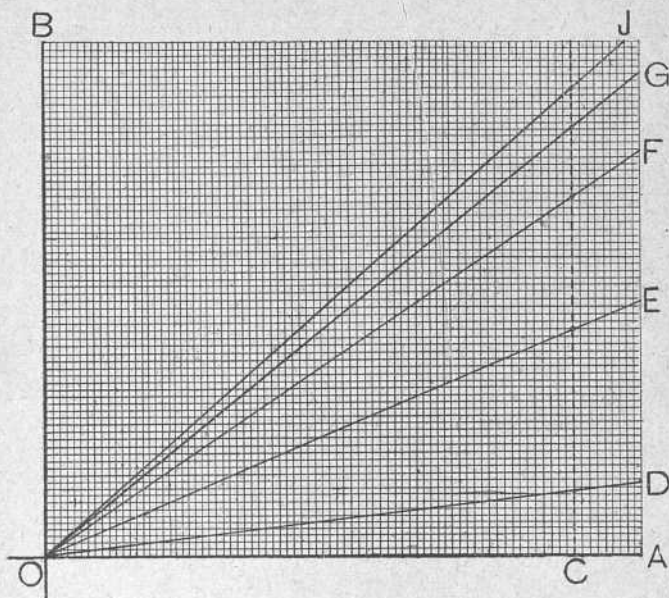


Fig. 13

EJEMPLO. Para la misma máquina, cuya característica en vacío a 1480 revoluciones viene representada en la figura 12, se desean trazar sus características de tensión y velocidad correspondientes a las corrientes inductoras de 2, 1'5, 1, 0'5, 0'0 amperios.

Como siempre, sobre un papel cuadrulado (figura 13), tomaremos dos ejes rectangulares AO y BO ; adoptaremos el primero por eje de revoluciones y el segundo por eje de tensiones, y vamos a escoger para la escala de tensiones cuatro voltios por división y para la escala de velocidades, veinte revoluciones por división.

Sobre el eje AO tomaremos un punto C que corresponde a 1480 revoluciones, y por dicho punto levantaremos una perpendicular y en ella determinaremos los puntos correspondientes a las tensiones inducidas por las corrientes de referencia que, según el gráfico de la figura 12, deben ser:

para 2	amperios	....	264	voltios
»	1'5	»	....	242 »
»	1	»	....	202 »
»	0'5	»	....	128 »
»	0'0	»	....	38 »

Uniendo cada uno de estos puntos con el origen O , resultan las características pedidas, que son: OD la característica para 0 amperios; OE , la de 0'5 amperios; OF , la de 1 amperio; OG , la de 1'5 amperios; y OJ , la de 2 amperios.

Característica externa. — En la característica externa, o característica en carga, se estudian las variaciones que experimenta la tensión disponible de una dínamo al variar su carga, permaneciendo constantes la velocidad y la resistencia del circuito inductor.

Al estudiar esta característica debe tenerse en cuenta la clase de excitación que tenga la dinamo, pues la forma de la curva varía con el modo de estar excitada la máquina.

Dinamo de excitación separada. — Para determinar experimentalmente la característica externa de una dinamo de excitación separada, como la de la figura 11, se completa el esquema representado en dicha figura derivando de los bornes *A* y *B* una resistencia variable provista de amperímetro para poder medir en él la corriente de carga suministrada por la dinamo en ensayo. Preparado así el circuito, se mueve la dinamo con velocidad normal uniforme y se conserva constante la corriente del inductor *CD*. En el amperímetro de la resistencia y en el voltímetro derivado de los bornes *A* y *B*, se pueden observar las variaciones de la corriente y de la tensión, suministradas por la dinamo al circuito de la resistencia, y en ellos podremos tomar los datos necesarios para el trazado de la misma.

La figura 14 es la característica externa de una dinamo excitada separadamente. Sobre el eje *OA* se toman los valores de la corriente y en el eje *OB* se buscan las tensiones disponibles. Cuando la corriente exterior es nula, la máquina funciona en vacío y la tensión disponible *OD* será igual a la fuerza electromotriz hallada en la característica interna de la misma máquina para igual corriente de excitación. A medida que la corriente exterior aumenta, la tensión disponible disminuye y los

puntos de la curva se acercan al eje OA tanto más aprisa cuando mayor sea la reacción del inducido y su resistencia óhmica.

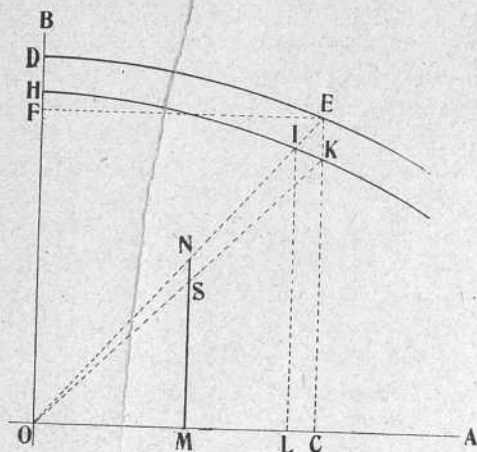


Fig. 14

Para una corriente exterior igual a OC (fig. 14) la tensión disponible es igual a CE y la diferencia entre esta tensión y OD representa la pérdida de voltios producida por la corriente OC en el interior de la máquina.

Esta pérdida se compone de dos partes, una debida a la caída óhmica producida por la resistencia del inducido y de las escobillas y otra debida a la desmagnetización de los núcleos producida por el flujo de reacción. Estas dos partes es fácil separarlas, ya que la caída óhmica puede ser calculada por la ley de Ohm

$$V = RI$$

siendo R , la resistencia de escobillas e inducido medida por el método detallado en el capítulo I; e I , la corriente OC .

La diferencia entre DF (fig. 14), y el resultado hallado por la fórmula de Ohm, será el efecto debido a la reacción del inducido.

Uniéndolo el punto E con el origen O , resulta un ángulo EOA proporcional a la resistencia que el circuito exterior tiene, al circular por él la corriente OC .

Para hallar el valor de dicha resistencia basta tomar sobre el eje OA una distancia OM igual a la unidad adoptada para la escala de corrientes; por el punto M se levanta una perpendicular, hasta encontrar a la recta OE , y su longitud MN , medida con la misma escala adoptada para las tensiones, equivale a los ohmios de la resistencia exterior.

Si al inductor CD (fig. 11) le diésemos otra corriente de excitación, distinta de la utilizada para el trazado de la curva DE (fig. 14), obtendríamos una característica externa de igual forma; pero situada a menor o mayor distancia del eje OA según fuese disminuída o aumentada la corriente inductora.

Cuando se ha determinado experimentalmente la característica externa de un dínamo de excitación separada y se dispone de su característica en vacío, pueden dibujarse todas las características externas que convenga, sin necesidad de tomar experimentalmente nuevos datos.

Para dibujar una nueva curva HIK , se busca

su tensión inicial OH , averiguando en la característica en vacío qué fuerza electromotriz producía la corriente inductora escogida para la nueva curva y una vez conocido OH , basta trazar la curva paralelamente a DE , ya que la pérdida interior en voltios, producida por la corriente de carga, es independiente del flujo inductor.

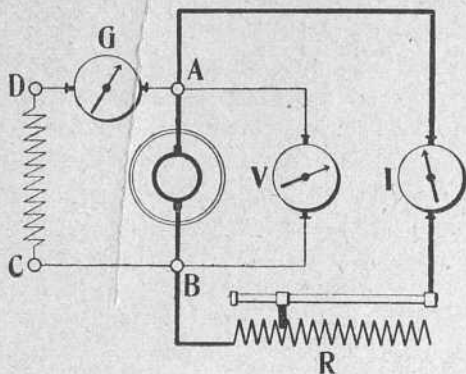


Fig. 15

Con la nueva corriente de excitación, tendremos la misma corriente de carga OC , si la resistencia exterior vale MS ; en tal caso la tensión disponible será CK ; pero con la resistencia exterior igual a NM tendríamos sólo una corriente OL y una tensión disponible LI .

Dinamo de excitación shunt. — Cuando la máquina que se ha de ensayar tiene el inductor CD (figura 15) derivado, conviene intercalar un am-

perímetro G en su circuito, a fin de poder observar las variaciones que sufra la corriente inductora durante el ensayo. Para poder medir la diferencia de tensión entre los bornes A y B , se deriva de ellos un voltímetro V , y para cargar la máquina se lleva la corriente inducida una resistencia variable R montada en serie con un amperímetro I que medirá la corriente de carga.

Variando la resistencia R , variarán las indicaciones del amperímetro I , y para cada valor de la corriente leído en él, se tendrá en V una tensión distinta, y como consecuencia de esta variación de voltaje, tendremos una corriente inductora diferente, la cual se puede leer en el amperímetro G .

Con las diversas indicaciones de I , V y G , se puede formar una tabla que luego se aprovecha para dibujar la característica externa DH (fig. 16) y la curva de corrientes inductoras CF .

Cuando el circuito de la resistencia R está interrumpido, la corriente inductora OC es máxima y lo mismo la tensión disponible OD . Al cerrar el circuito exterior, disminuye la diferencia de tensión entre los bornes A y B , y la curva DH se acerca al eje OA , como en la máquina de excitación separada, pero mucho más rápidamente que en la figura 14, porque en este caso la pérdida interior de voltios, no sólo es debida a la caída óhmica y a la desimantación producida por el flujo reactivo, como allí, sino que además está influida por la disminución de corriente inductora, representada por la curva CF .

Para una corriente útil OE (fig. 16), la tensión

disponible sería EH y la corriente inductora FE . La caída interior debida a la resistencia óhmica, flujo reactivo y disminución de flujo inductor, sería la diferencia DJ , entre OD y EH .

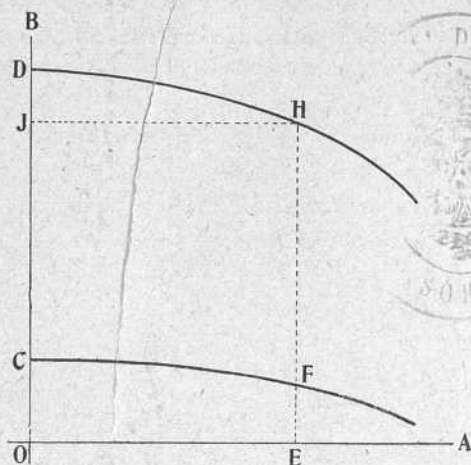


Fig. 16

Para separar la parte correspondiente a la disminución de flujo inductor, bastará buscar en la característica interna la fuerza electromotriz producida por la corriente EF y restarle la tensión EH ; la diferencia será la pérdida de tensión debida solamente a la reacción del inducido y a la resistencia óhmica del mismo. La parte correspondiente a esta última puede calcularse por la ley de Ohm.

$$V = RI$$

siendo I , en este caso, la suma de OE y EF .

Como en la figura 14, podríamos determinar la resistencia del circuito exterior aplicando el mismo método detallado allí.

Dinamo excitada en serie. — Cuando la dinamo tiene el inductor en serie, su característica externa

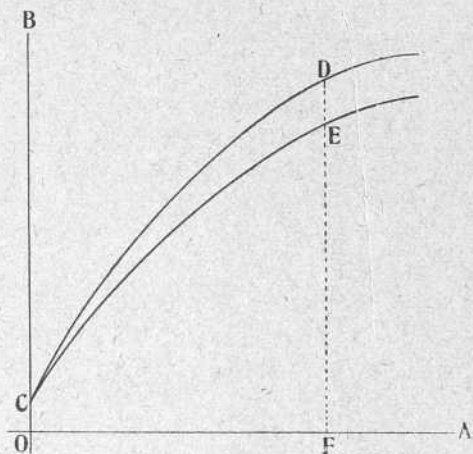


Fig. 17

CE (fig. 17), tiene la misma forma que la interna CD ; arrancan del mismo punto C , correspondiente a la tensión del remanente, pero sus ordenadas son menores que las de la curva en vacío, siendo la diferencia entre unas y otras igual a la caída interior debida a la corriente respectiva. Así, para una corriente OF (fig. 17), la tensión disponible sería FE y la caída interior DE .

Dínamos de excitación compuesta. — La característica externa de una máquina compound, es sencillamente una recta CD (fig. 18), paralela al eje de corrientes OA , siempre que la dínamo esté

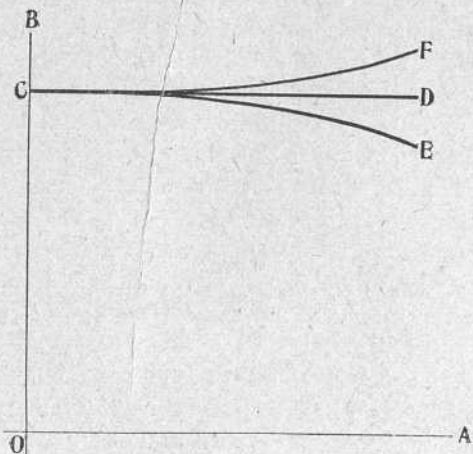


Fig. 18

bien compoundada; pero resulta una curva CE dirigida hacia abajo, si el inductor serie es deficiente; en cambio, la concavidad de la curva resulta dirigida hacia arriba, CF , si el inductor serie es excesivo.

Rendimiento. — Las máquinas eléctricas son sencillamente transformadores de energía, cuyo objeto se reduce siempre a consumir una energía fácilmente disponible para producir otra de forma

más aplicable. Así, en el motor eléctrico, la energía consumida es eléctrica, suministrada por la red general, y en él se produce una energía mecánica adecuada para el funcionamiento de máquinas y herramientas; en cambio, la dínamo o el alternador consumen siempre energía mecánica, que puede estar suministrada por una turbina, una máquina de vapor o un motor de explosión, y la energía que producen es eléctrica, fácilmente aprovechable para alumbrado, trabajos térmicos, operaciones electroquímicas o alimentar electromotores.

La energía consumida por una máquina eléctrica durante un segundo, es conocida con el nombre de potencia total y la representaremos por W_t . La energía producida por la máquina eléctrica en el mismo tiempo, la representaremos por W_u y se conoce con el nombre de potencia útil.

La potencia útil es siempre menor que la total; su diferencia es la parte de energía que se pierde en la transformación, y se designa con el nombre de potencia perdida; la representaremos por W_p .

Entre las potencias total, útil y perdida, debe cumplirse siempre las relaciones

$$W_t = W_u + W_p \quad [10]$$

$$W_u = W_t - W_p \quad [11]$$

El cociente que resulta de dividir la potencia útil de una máquina por su potencia total, es lo que se conoce por rendimiento industrial de la máquina, y tiene por fórmula

$$\rho = \frac{W_u}{W_t} \quad [12]$$

Este rendimiento es menor que la unidad, puesto que el divisor es siempre mayor que el dividendo.

Aprovechando las relaciones [10] y [11], podremos dar al rendimiento las siguientes formas:

$$\rho = \frac{W_u}{W_u + W_p} \quad [13]$$

$$\rho = \frac{W_t - W_p}{W_t} \quad [14]$$

Medida directa del rendimiento de un motor.—

La potencia consumida por un motor de corriente continua, se obtiene multiplicando el voltaje aplicado por la corriente consumida; luego podremos calcular la potencia total por la fórmula

$$W_t = VI \quad [15]$$

Además, la potencia útil producida por el motor puede determinarse midiendo el par resistente con un dinamómetro (capítulo III) y aplicando la fórmula [6], que preparada para que dé la potencia en vatios, tomando las revoluciones por minuto, será

$$W_u = \frac{2\pi 9'81nC'}{60} = 1'028nC' \quad [16]$$

Pudiendo conocer directamente la potencia útil [16] y la total [15], determinaremos el rendimiento aplicando la fórmula [12] y resultará

$$\rho = \frac{1'028nC'}{VI}$$

Al variar el par resistente de un electromotor, sin

alterar notablemente su velocidad, varía la potencia útil y en el mismo sentido se modifica la potencia total; pero siendo constante el voltaje aplicado, la variación de W_i (fórmula [15]) depende sólo de la corriente I , de manera que, en el motor de continua los amperios consumidos son una función del par resistente.

Para cada valor de C' y de I , resultará un rendimiento industrial distinto, y determinando varios valores de este rendimiento para otros tantos de la corriente, puede formarse con ellos una tabla para el trazado de una curva que sería la *característica de rendimientos* a tensión constante. Cuando se tiene trazada la característica de rendimiento de un motor, se dice que este motor está calibrado.

Medida del rendimiento de un motor por el método de pérdidas separadas. — Partiendo de la fórmula [14] es posible calcular el rendimiento de una máquina cuando se conozca su potencia total y sus pérdidas.

La potencia total de un motor de continua, viene dada por la fórmula [15] y cuando el electro-motor funciona a tensión constante, basta atribuir valores a I para tener la potencia total correspondiente a cada amperaje.

La potencia perdida en un motor consta de varias partes, que son:

Pérdida por efecto Joule en el inducido, que puede ser calculada por la fórmula (tomo I, pág. 104).

$$W_j = rI^2 \quad [17]$$

siendo r la resistencia en caliente del rotor y escobillas;

Pérdidas magnéticas, debidas a la histeresis y al efecto Foucault, y

Pérdidas mecánicas, debidas al rozamiento de los cojinetes, escobillas y aire.

Las pérdidas magnéticas y mecánicas se suelen reunir para medirlas en conjunto, y nosotros las representaremos por m .

Teniendo en cuenta las partes componentes de la potencia perdida, su fórmula será

$$W_p = rI^2 + m$$

Con este valor de la potencia perdida y el de la potencia total dado por la fórmula [15], la expresión [14] del rendimiento se convierte en

$$\rho = \frac{VI - rI^2 - m}{VI} \quad [18]$$

La resistencia r del inducido es constante, después que la máquina ha alcanzado su temperatura de régimen, y puede medirse por el procedimiento ya descrito en el capítulo I.

Las pérdidas magnéticas y mecánicas, pueden considerarse constantes mientras sea invariable la tensión de servicio y la velocidad del rotor no altere de un modo notable. En motores de inducido derivado, se mide m , averiguando la potencia consumida por el motor al funcionar sin carga y con la tensión normal, porque para este estado de funcionamiento, la potencia útil es nula y el efecto Joule despreciable.

Partiendo de la fórmula [18] pueden calcularse los rendimientos para cada corriente I , sin efectuar más mediciones que las de r y de m .

EJEMPLO. *Determinar la característica de rendimientos de un motor de corriente continua a 60 voltios y 1500 vatios, sabiendo que la resistencia de su inducido es de 0'1 ohmio y que al girar sin carga consume 4'5 amperios.*

El valor de m , será siempre

$$m = 4'5 \times 60 = 270 \text{ vatios}$$

Cuando el motor consume 6 amperios, su potencia total es

$$W_t = 60 \times 6 = 360 \text{ vatios}$$

las pérdidas en el cobre son

$$rI^2 = 0'1 \times 6^2 = 3'6 \text{ vatios}$$

las pérdidas totales

$$W_p = 3'6 + 270 = 273'6 \text{ vatios}$$

la potencia útil [11]

$$W_u = 360 - 273'6 = 86'4$$

y el rendimiento

$$\rho = \frac{86'4}{360} = 0'24$$

Repetiendo las mismas operaciones para las corrientes de 8, 10, 12, 14, ... amperios, podremos formar la tabla siguiente:

Amperios	W_u	rI^2	W_u	ρ
6	360	3'6	86'4	0'240
8	480	6'4	203'6	0'424
10	600	10'0	320'0	0'533
12	720	14'4	435'6	0'605
14	840	19'6	550'6	0'655
16	960	25'6	664'4	0'692
18	1080	32'4	777'6	0'720
20	1200	40'0	890'0	0'742
22	1320	48'4	1001'6	0'760
24	1440	57'6	1112'4	0'772
26	1560	67'6	1222'4	0'783
28	1680	78'4	1331'6	0'792

Ahora, para trazar la curva, bastará tomar sobre el eje OA (fig. 19) distancias equivalentes a los amperios y sobre el eje OB , alturas proporcionales a los rendimientos, uniendo después los puntos que resulten se tiene la característica de rendimientos. Para tomar los puntos hemos escogido para

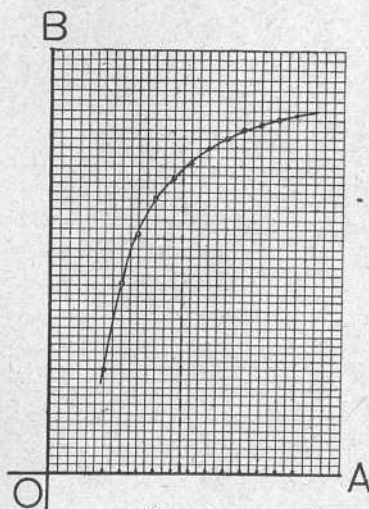


Fig. 19

la escala de corrientes una división por amperio; y para la escala de rendimientos 50 divisiones por unidad.

Trazada ya la característica de rendimientos, se puede saber el rendimiento industrial para cualquier corriente de carga; así, para 15 amperios (15 divisiones) el rendimiento será 0'67.

Medida directa del rendimiento de una dínamo.—

Cuando se dispone de un motor calibrado, es fácil medir el rendimiento de una dínamo determinando directamente su potencia útil y total.

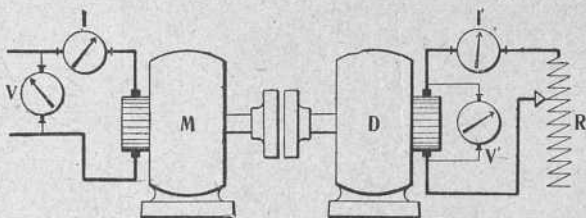


Fig. 20

Para ello se prepara la instalación representada esquemáticamente en la figura 20. El motor calibrado *M* se acopla directamente a la dínamo *D*, si tienen igual velocidad, en caso contrario el movimiento debe transmitirse por correa sin fin a poleas de conveniente diámetro, procurando que la transmisión sea lo más perfecta posible, sin deslizamientos, para perder poca potencia en ella.

La potencia útil, producida por la dínamo, se

consume, en la resistencia R , y se determina midiendo la tensión en el voltímetro V' y la corriente en el amperímetro I' ; su valor será

$$W_u = V'I'$$

La potencia total consumida por la dínamo está suministrada por el motor y constituye la potencia útil del mismo; potencia que podemos conocer midiendo la total, dada por las indicaciones de V y de I , y multiplicando su valor por el rendimiento ρ_m del motor correspondiente a la corriente de I , cuyo valor, estando el motor calibrado, podemos encontrarlo en su característica de rendimientos.

Buscada la potencia útil y la total, encontraremos el rendimiento de la dínamo por la fórmula [12]

$$\rho_d = \frac{W_u}{W_t} = \frac{V'I'}{\rho_m VI} \quad [19]$$

Regulando la corriente de excitación, en la dínamo, podemos mantener constantes las indicaciones de V' , y regulando la corriente inductora del motor, conseguiremos mantener constante la velocidad de la dínamo. Variando la resistencia R , tendremos cargas distintas en la dínamo, y buscando el rendimiento para cada una de dichas cargas, podremos tener los datos necesarios para el trazado de la característica.

En el caso particular de que las máquinas M y D fuesen iguales, podríamos determinar, simultáneamente, el rendimiento de las dos sin necesidad de tener calibrada la máquina M ; basta para ello

suponer que siendo las máquinas iguales tendrán el mismo rendimiento de modo que los rendimientos ρ_a y ρ_m son iguales a un rendimiento común ρ . En efecto, la fórmula [19] puede tomar la forma

$$\rho_m \rho_a = \frac{V'I'}{VI} = \rho^2$$

de donde

$$\rho = \sqrt{\frac{V'I'}{VI}}$$

y en el caso que las tensiones V' y V fuesen iguales, resultar a sencillamente

$$\rho = \sqrt{\frac{I'}{I}} \quad [20]$$

Método de recuperación. — Al determinar simultáneamente el rendimiento de dos máquinas iguales, toda la potencia producida por la máquina D (figura 20), se consumía en la resistencia R , perdiéndose inútilmente en calor; tratándose de dos máquinas iguales, que pueden tener el mismo voltaje, resultaría más económico el ensayo, si en lugar de mandar la potencia de la máquina D a la resistencia, se aprovechase para alimentar el motor M , descargando de ese modo la red, que sólo debería suministrar la diferencia entre la potencia total VI y la útil $V'I'$, o sea, la parte correspondiente a las pérdidas de las dos máquinas. En esto se funda el llamado método de recuperación, y

para aplicarlo debe disponerse el montaje representado esquemáticamente en la figura 21.

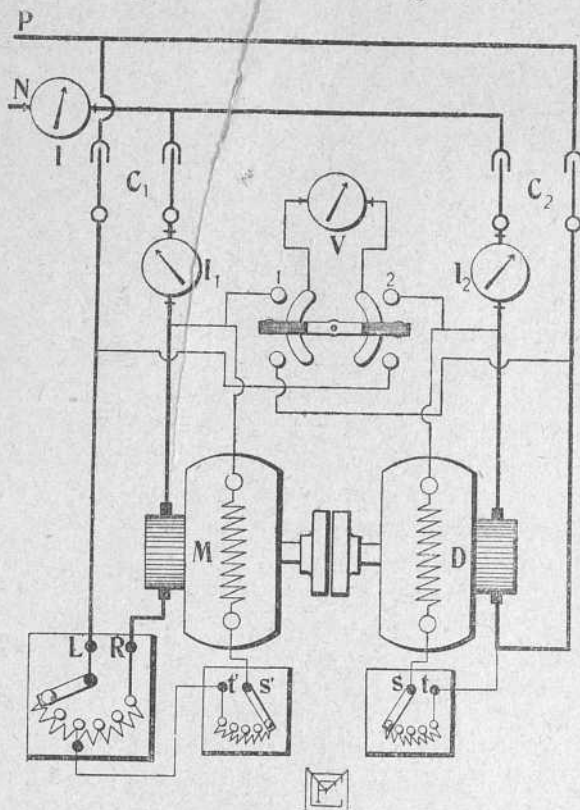


Fig. 21

Cada máquina está provista de un reóstato st , regulador de campo, para poder igualar las tensiones en el momento de acoplar; estas tensiones

se miden en el voltímetro V , que según la posición 1 ó 2 de su conmutador registra los voltajes de M o D . Los amperímetros I_1 e I_2 , miden las corrientes de cada máquina y el amperímetro I , indica la corriente que suministra la red PN . Ambas máquinas están provistas de interruptores bipolares C_1 y C_2 , para poderlas poner en circuito, y el motor M cuenta con un reóstato LR , para el arranque.

Para operar, debe empezarse por poner en marcha el motor M , cerrando el interruptor C_1 y regulando con el reóstato LR . En marcha ya las dos máquinas, se excita la dínamo D y se regula su reóstato st hasta que produzca una tensión igual a la suministrada por la red; lo cual se comprueba con el voltímetro V , averiguando si sufre igual desviación en las posiciones 1 y 2 de su conmutador. Inmediatamente se cierra el interruptor C_2 y con esto quedan acopladas las dos máquinas a la red.

Para cargar el grupo se aumenta la excitación de la dínamo D y se disminuye la del motor M ; con la primera operación, aumenta la corriente del generador, y con la segunda se procura sostener constante la velocidad del grupo.

La corriente producida por el generador D (medida en I_2) se suma a la corriente suministrada por la red (medida en I) y la resultante, circula por el motor M y el amperímetro I_1 .

La potencia total, consumida por el motor será VI_1 , y la potencia útil, producida por la dínamo, deberá ser VI_2 . Siendo iguales las tensiones

determinaremos el rendimiento, común a las dos máquinas, por la fórmula [20]

$$\rho = \sqrt{\frac{I_2}{I_1}}$$

Cuando no se dispone de corriente continua, de igual tensión que la de las máquinas, con que compensar las pérdidas, se puede procurar la compensación mecánicamente, ayudando el movimiento de las dos máquinas con un motorcito calibrado, cuya potencia útil sería la potencia perdida en M y D , la cual deberíamos añadir a la potencia producida por D , para tener la total consumida por las dos máquinas acopladas.

Si las dos máquinas tienen el inductor compuesto y se quiere determinar sus rendimientos por el método de recuperación, debe prescindirse de los inductores serie, dejando sólo que funcionen las derivaciones para evitar el peligro de la inversión de polaridad (tomo IV, pág. 113).

Medida del rendimiento de una dinamo, por el método de pérdidas separadas. — Toda dinamo, al funcionar, produce una potencia útil, aprovechada en el circuito exterior, igual al producto de los voltios disponibles V por los amperios I que suministra.

En la dinamo, como en el motor, existe siempre una pérdida de energía compuesta de pérdidas eléctricas, rI^2 , y de pérdidas mecánicas y magnéticas, m . Para el funcionamiento normal de la dí-

namo, es preciso comunicarle una energía mecánica cuya potencia total, según la fórmula [10], debe ser

$$W_t = W_u + W_p = VI + rI^2 + m$$

Cuando sea posible conocer la resistencia del inducido y las pérdidas m de una máquina, podrá calcularse su rendimiento por la fórmula [13], transformada como sigue

$$\rho = \frac{VI}{VI + rI^2 + m}$$

El valor de m puede determinarse por el mismo procedimiento que hemos detallado para los motores; pero resulta más natural medirlo moviendo la máquina por medio de un motor calibrado, a la velocidad normal y con la excitación necesaria para producir la tensión de régimen, la potencia útil dada por el motor corresponde a las pérdidas mecánicas y magnéticas de la máquina.

Separación de pérdidas. — Cuando el valor de m resulta exagerado, es conveniente separar las pérdidas mecánicas de las magnéticas para poder apreciar cuál es la parte defectuosa.

Funcionando la máquina como máquina, movida por un motor calibrado, es fácil separar de m las pérdidas magnéticas, ya que suprimiendo la excitación de la máquina, desaparecen las pérdidas magnéticas y la potencia útil del motor sólo debe vencer las pérdidas mecánicas de la máquina, debidas

al rozamiento del aire, cojinetes y escobillas. Para separar el efecto debido a estas últimas, bastaría levantarlas hasta que no rozasen con el colector.

Si la máquina funciona como motor, se procede de la manera siguiente, para la separación de pérdidas. Marchando el motor sin carga, se disminuye su corriente inductora al mismo tiempo que la tensión, procurando que la velocidad se mantenga normal y se efectúan las mediciones necesarias para poder trazar la curva de pérdidas en vacío, como función de la corriente inductora. Disminuyendo el flujo, las pérdidas de histeresis y Foucault serán cada vez menores, y si el flujo llegase a anularse, las únicas pérdidas que el motor tendría serían mecánicas, las cuales permanecen constantes durante el ensayo, porque la velocidad se mantiene normal. No es posible continuar el ensayo hasta la anulación del flujo, porque en tal caso no giraría el motor; pero cuando se tiene la forma y orientación de la curva, es fácil prolongarla sobre el dibujo, hasta cortar el eje vertical, y la distancia entre el punto de contacto y el origen representa las pérdidas mecánicas del motor.

Conocidas las pérdidas mecánicas, por sustracción con m encontraremos las pérdidas magnéticas.

Las pérdidas magnéticas, debidas a la histeresis y al efecto Foucault, también deben separarse en sus partes componentes, cuando conviene averiguar si dichas pérdidas provienen, en su mayor parte, de la alta inducción o de la mala permeabilidad del circuito magnético (histeresis), o bien si

se deben a la mala calidad de las planchas o a su defectuoso aislamiento (Foucault).

El procedimiento gráfico empleado para dicha separación, está fundado en que, mientras la inducción del campo magnético no altere, *las pérdidas por histeresis son proporcionales a la velocidad, y las pérdidas debidas a las corrientes de Foucault dependen del cuadrado de la velocidad.* Según este principio, podemos representar las pérdidas magnéticas por la expresión.

$$W_h = Hn + Fn^2 \quad [21]$$

en la cual n representa las revoluciones del rotor H y F , dos constantes que multiplicadas por n y n^2 den las pérdidas de histeresis y de Foucault.

Las pérdidas magnéticas W_h , se pueden representar por el producto

$$W_h = EI$$

siendo I la corriente correspondiente a dichas pérdidas y E la fuerza electromotriz producida por el flujo inductor a la velocidad n del rotor. Esta fuerza electromotriz, según la fórmula [7], es proporcional a las revoluciones de la máquina y se puede representar por

$$E = Kn$$

Con estas consideraciones la fórmula [21] se convierte en

$$KnI = Hn + Fn^2$$

y dividiendo todos los miembros por Kn , resulta

$$I = \frac{H}{K} + \frac{F}{K}n \quad [22]$$

En esta ecuación, mientras el flujo inductor sea constante, son constantes H , K y F ; al variar n cambiará I , de modo que para cada velocidad resultará una corriente distinta y bien determinada.

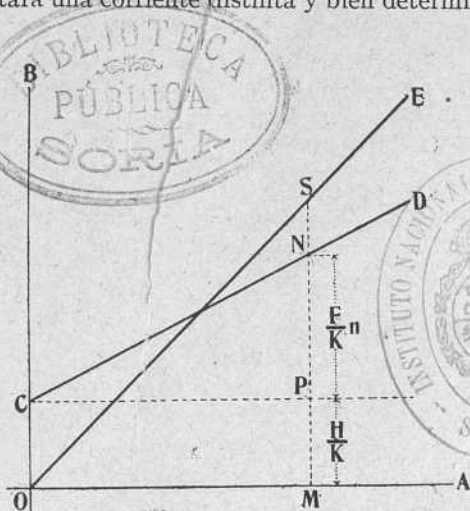


Fig. 22

La curva representativa de los diferentes valores de n y de I , sería la *característica de revoluciones y corrientes* para el funcionamiento de la máquina, como motor sin carga, con la corriente de excitación constante. Esta característica está representada por una recta CD (fig. 22) que es fácil de determinar sin más que buscar dos de sus puntos. Estos puntos se determinan experimentalmente haciendo funcionar la máquina como motor sin carga y con excitación separada y constante; variando

la tensión aplicada cambiará la velocidad del motor y un amperímetro instalado en el circuito del rotor indicará la corriente que el motor toma a cada velocidad.

Tomando, sobre el eje de revoluciones una magnitud OM , igual a n , resulta la corriente I representada por MN . Esta recta, según la igualdad [22] puede descomponerse en dos partes $\frac{H}{K}$ y $\frac{F}{K}n$; la primera es constante e independiente de n , única que encontraríamos para $n = 0$, luego debe ser OC y trazando por C una paralela a OA encontraremos su igual MP ; la parte NP debe representar $\frac{F}{K}n$, ya que sumada con MP es igual a I .

Conociendo gráficamente los sumandos de la igualdad [22], bastaría multiplicarlos por E para conocer los sumandos de la fórmula [21] y con ellos sabríamos las partes componentes de las pérdidas magnéticas.

Para facilitar esta operación se traza, en la misma figura 22, la característica OE de tensiones y velocidad a excitación constante, adoptando como corriente inductora la misma que se ha escogido para la característica OD . Sobre la recta OE encontraremos la tensión que nos convenga para buscar las pérdidas de histeresis y de Foucault correspondientes a la velocidad que se quiera.

Concretando, las pérdidas por histeresis, para una velocidad OM , serán

$$MP \times MS$$

y las pérdidas de Foucault, para la misma velocidad, serán

$$PN \times MS$$

Pruebas en motores serie. — Un motor de inductor en serie sufre grandes variaciones de velocidad al variar su carga, y sus pérdidas mecánicas y magnéticas no son constantes, como hemos supuesto en los motores de inductor derivado o compuesto. Su rendimiento podrá calcularse por la fórmula [18]

$$\rho = \frac{VI - rI^2 - m}{VI}$$

pero buscando antes los valores de m , para cada carga.

Primero se hace funcionar el motor serie con carga a tensión constante, para trazar las curvas de corriente y tensión del colector, en función de la velocidad. Un amperímetro en serie con el motor medirá las corrientes de carga, y un voltímetro derivado a la entrada de las escobillas podrá medir las tensiones del colector, que, aunque el voltaje de la red sea constante, dicha tensión resulta variable, por la caída óhmica del inductor serie.

Trazadas las curvas de corrientes y de tensiones, en función de la velocidad, se hace funcionar el motor en vacío y con la excitación separada, aplicando sucesivamente a la entrada de las escobillas las tensiones medidas en carga, y regulando la excitación para que la velocidad de la máquina

resulte la misma que tenía a igual tensión y cargada. La potencia consumida por el motor equivaldrá a sus pérdidas mecánicas y magnéticas correspondiente a la misma velocidad de motor cargado. Así podremos trazar la curva de m en función de la intensidad de carga, y con ella será posible aplicar la fórmula [18] para calcular los rendimientos.

Rigidez dieléctrica. — El devanado de una máquina eléctrica forma con la armadura y núcleos de la misma un condensador (tomo I, cap. V) cuyo dieléctrico es el aislante del devanado. Este aislante, además de ofrecer gran resistencia al paso de la corriente de pérdida, debe tener gran rigidez; es decir, debe poder resistir sobretensiones superiores al voltaje de servicio, sin que sea perforado por las descargas electrostáticas, que siempre se producen entre las armaduras de un condensador.

En voltajes usuales, no superiores a 500 voltios, el aislamiento de una máquina de corriente continua debe resistir una sobretensión alternativa de 1000 voltios, durante un minuto.

Para probar la rigidez dieléctrica de los aislantes de una máquina, se dispone el montaje de la figura 23.

El secundario de un transformador T está unido por un polo a la masa a de hierro de la máquina M y por el otro polo, a los bornes b del devanado. El primario del transformador está en serie con un reóstato R , que permite regular el voltaje de alimentación. Un voltímetro electros-

tático V indica la tensión producida por la alta del transformador y señala el momento en que la corriente llega a perforar el aislante, puesto que, en caso de ocurrir este accidente, queda en corto circuito la alta del transformador y su tensión se anula.

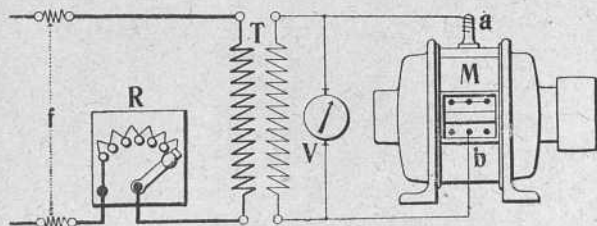


Fig. 23

Para evitar que los devanados del transformador puedan quemarse, al perforarse los aislantes de la máquina en prueba, debe tener buenos fusibles / en su circuito primario.

Observación general. — Todos los ensayos deben efectuarse en caliente, después de algunas horas de funcionamiento a plena carga, para que los devanados y los cojinetes tengan la temperatura de régimen y resulten constantes las resistencias óhmicas y las resistencias de rozamiento.

CAPÍTULO V

PRUEBA DE TRANSFORMADORES

Comprobación de espiras. — Antes de montar los carretes de un transformador en los núcleos del mismo, conviene comprobar si al devanarlos ha habido error en la cuenta de vueltas, o si efectivamente contienen las espiras proyectadas.

El procedimiento empleado para esta operación, es el llamado método del cero, que consiste en lo siguiente:

Los carretes primario y secundario de una de las ramas del transformador, se introducen en un circuito magnético universal provisto de núcleos, fácilmente cambiables, capaces para carretes de todas dimensiones. La baja, uv , del transformador así formado, se monta en paralelo con la baja $u'v'$ de un transformador de comprobación (fig. 24), y los carretes del alta UV y $U'V'$, se conectan en oposición a través de un voltímetro B .

La alta del transformador de comprobación tiene las espiras numeradas, y mediante contactos movibles pueden quedar en circuito un número bien determinado de ellas.

Los transformadores se alimentan por la baja, a débil tensión, y si tienen la misma relación de espiras, las tensiones de las altas resultarán iguales y la aguja del voltímetro *B* permanecerá en el cero

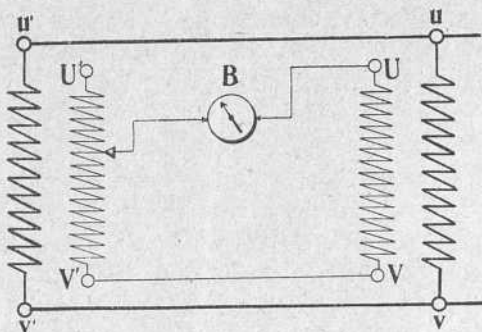


Fig. 24

de la escala. Cuando el voltímetro acusa alguna tensión, se consigue que vuelva a cero variando el número de espiras de $U'V'$, y conseguido el equilibrio, puede formarse una proporción, igualando las relaciones de espiras en ambos transformadores.

$$\frac{N'}{n'} = \frac{N}{n}$$

N' y n' , espiras de alta y baja en el transformador de comprobación, son bien conocidas; y n , número de espiras en la baja del transformador que se prueba, se supone igual a las espiras proyectadas, pues siendo pequeño su número, difícilmente puede haber error en su cuenta.

Conociendo tres términos de la proporción, podemos buscar el cuarto término N y comprobar si coincide con el número proyectado. En caso contrario, podremos buscar, por sustracción, las espiras sobrantes o por añadir.

Comprobado el número de espiras en todos los carretes de un transformador, se puede autorizar su montaje y conexión.

Relación de tensiones. — Montados los carretes en sus propios núcleos y preparadas las conexiones, debe procederse a comprobar la relación de transformación, antes de soldar las conexiones, y de introducir el transformador en la caja de protección.

Para esta operación se aplica a la baja del transformador un voltaje conocido, que sea sólo la mitad o la tercera parte del normal, y se mide en los bornes de la alta, la tensión inducida. La relación entre las tensiones, aplicada e inducida, debe ser, aproximadamente, igual a la relación entre las tensiones de servicio propias del transformador.

Esta prueba no puede efectuarse con la tensión normal del transformador, porque estando sus aislantes sin cocer, no la resistirían.

La tensión inducida en los carretes de alta, pocas veces puede ser medida directamente con voltímetros; en general debe medirse por transformación (tomo XXVIII, cap. III), empleando transformadores de tensión que alimentan voltímetros de poca resistencia.

Cuando el transformador que se ha de ensayar

es polifásico, debe comprobarse la transformación puente por puente, y para ello se dispone un montaje análogo al representado en la figura 25.

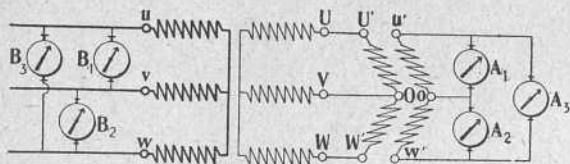


Fig. 25

El transformador en ensayo está representado por los devanados $u, v, w - U, V, W$; los voltímetros B_1, B_2 y B_3 miden la tensión aplicada en los tres puentes de baja; los dos transformadores de tensión $U', O - u', o$ y $W', O - w', o$, montados en V , alimentan los voltímetros A_1, A_2 y A_3 , que miden, por transformación, las tensiones inducidas en los tres puentes de alta.

En lugar de emplear tres voltímetros en el circuito de baja y otros tantos en el de alta, podríamos conseguir el mismo objeto, con un solo voltímetro en cada circuito, combinado con un conmutador doble de tres direcciones.

Si el transformador es trifásico, también debe comprobarse si la conexión de las fases está conforme con las normas de la A. E. A. (tomo VIII, página 41).

Relación de corrientes. — En los transformadores de intensidad, destinados a la medición de

grandes corrientes con amperímetros de poco calibre (tomo XXVIII, cap. II), debe comprobarse la relación de transformación en amperios.

La operación puede disponerse tal como está indicada en la figura 26. De un generador de alterna G se toma corriente para el primario $L_1 L_2$ del transformador de corriente, intercalando en su circuito una resistencia variable R para poder

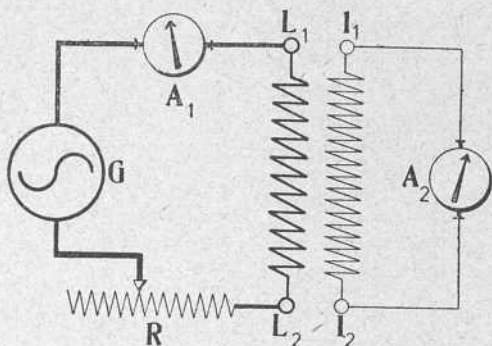


Fig. 26

variar la corriente, y un amperímetro A_1 , para medirla; el secundario I_1, I_2 se une al amperímetro A_2 . Las corrientes leídas en A_1 y A_2 nos darán la relación de transformación, que debe ser igual a la relación invertida del número de espiras de los dos carretes del transformador.

Comprobada la relación de transformación puede terminarse el montaje y fabricación del transformador.

Resistencias. — Para medir las resistencias de primario y secundario de un transformador, se sigue el procedimiento detallado en el capítulo I, tomando todas las precauciones que aconsejábamos en las *mediciones de máquinas de corriente alterna*.

Rigidez dieléctrica. — La rigidez dieléctrica de los circuitos del transformador, entre sí y con relación a la masa de hierro, se comprueba sometiendo las partes aisladas a una tensión alternativa que varía de vez y media a dos veces la tensión normal.

El reglamento de la A. E. A. da las siguientes reglas:

Para tensiones menores de 5000 voltios, debe probarse al doble de la tensión normal.

Para tensiones comprendidas entre 5000 y 10000 voltios, debe aumentarse en 5000 voltios la tensión normal.

Para tensiones superiores a 10000 voltios, debe probarse a vez y media la tensión normal.

El aislamiento del transformador se admite como bueno, si resiste esta sobretensión durante quince minutos.

Para esta prueba puede emplearse como generador de tensión, el mismo transformador que se ensaya, dando al circuito de baja una tensión superior a la normal, en la relación que fija el reglamento de la A. E. A., y uniendo una de las fases de alta a la masa; las demás fases y la masa quedan sometidas a distinto potencial, y si el aislamiento

presenta algún punto defectuoso, no puede resistir la sobretensión y es perforado por la descarga eléctrica, formándose un corto circuito que anula el voltaje y calienta fuertemente el punto averiado.

Si la prueba se sostiene durante quince minutos, queda probado el aislamiento de todas las fases, excepto el de la fase unida a la masa, y para probar también este aislamiento, debe sostenerse el ensayo quince minutos más; pero cambiando la fase unida a la masa.

Para que al mismo tiempo que se prueba la rigidez dieléctrica entre las fases de alta y la masa, quede probado el aislamiento entre las fases de alta y baja, debe unirse un punto de la baja con la masa; si la baja tiene punto neutro accesible éste es el que escoge como punto de unión; pero si la baja carece de neutro, se une a la masa el borne de una fase durante los primeros quince minutos, y luego en la segunda parte se cambia la unión de borne.

Si para probar el aislamiento se adopta este método, debe elevarse la tensión primaria sin que la corriente de este circuito llegue a ser mayor que la de carga; esto se consigue elevando su frecuencia al mismo que la tensión. En efecto, la fuerza electromotriz inducida en un transformador satisface la fórmula

$$E = 4'44fN\mathcal{C}10^{-8} \quad [23]$$

en la cual f representa la frecuencia; N , el número de espiras, y \mathcal{C} , el flujo producido por la corriente inductora o primaria; de modo que, sin variar esta

última, es posible aumentar la E haciendo f mucho mayor.

Al aumentar la frecuencia se comprueba mejor la rigidez dieléctrica del transformador, porque se aumenta también el número de veces por segundo que la fuerza electromotriz alcanza su máximo.

También puede comprobarse la rigidez dieléctrica de los aislantes de un transformador, empleando un elevador especial y siguiendo el procedimiento que hemos detallado al final del capítulo anterior para probar el aislamiento de las máquinas de corriente continua.

Pérdidas en vacío. — Un transformador funciona en vacío o sin carga, cuando tiene el circuito secundario abierto, estando cerrado el primario.

Al funcionar el transformador en vacío, se tiene en los bornes del secundario una tensión disponible, pero sin amperios, y no circulando corriente por el devanado secundario, no habrá en él pérdidas por ningún concepto.

En cambio, por el primario circulará la corriente necesaria para mantener la inducción de los núcleos, y esta corriente produce una pérdida por efecto Joule, calculable por la fórmula

$$W_j = r_1 I_1^2$$

pérdida que siempre resulta muy pequeña, ya que la corriente I_1 es muy débil por funcionar el transformador sin carga.

Circulando por los núcleos del transformador el flujo normal, las pérdidas de histeresis y Foucault

son normales, e iguales a las que el transformador tendría si estuviese cargado.

De todo lo que antecede resulta que al funcionar un transformador en vacío, si medimos la potencia que consume, mediante vatímetros instalados en su circuito primario, esta potencia será igual a las pérdidas magnéticas del transformador más una pequeña parte debida al efecto Joule del devanado

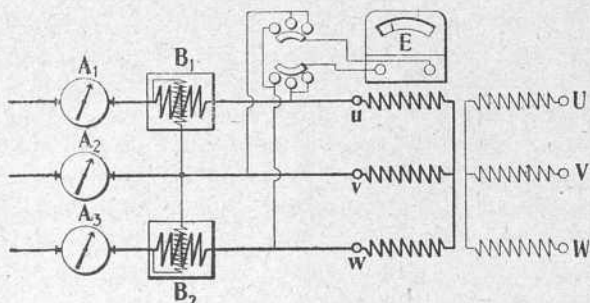


Fig. 27

primario, efecto que puede descontarse o despreciarse; generalmente se desprecia y se consideran como pérdidas magnéticas las que el transformador tiene al funcionar en vacío con la tensión normal.

Para medir las pérdidas en vacío se dispone el montaje de la figura 27. Las fases de alta U , V , W , se dejan abiertas, y las fases de baja u , v , w , se alimentan a través de los vatímetros B_1 y B_2 , y de los amperímetros A_1 , A_2 y A_3 ; el voltímetro E , combinado con un conmutador puede utilizarse para medir las tres tensiones en la misma entrada del transformador.

Para efectuar la medición, se comprueba primero, con el voltímetro, la normalidad de la tensión; hecho esto, se deja el voltímetro fuera de circuito, para que sus pérdidas no se sumen a las del transformador, y se leen las indicaciones de los dos vatímetros, que, sumadas, nos darán las pérdidas magnéticas. Si conviene hacer la corrección por la parte de efecto Joule del primario, deben leerse las corrientes de los tres amperímetros, para poder calcular luego con la resistencia de cada fase la pérdida correspondiente.

Pérdidas en corto circuito. — Si en lugar de tener el circuito secundario abierto, se cierra en corto circuito a través de un conductor sin resistencia, y en el primario se aplica una débil tensión, suficiente para hacer circular por él la corriente de carga, tendremos que esta corriente del primario inducirá en el devanado del secundario otra corriente que en virtud de la relación de transformación, debe ser igual a la que produciría el transformador funcionando a plena carga. Circulando dichas corrientes por los dos devanados, producen una pérdida en el cobre de primario y secundario igual a la que se produciría al funcionar el transformador normalmente y con la misma corriente.

Funcionando el transformador en corto circuito, su fuerza electromotriz es casi nula, y la fórmula [23] nos demuestra que, siendo constantes f y N , al tener un valor de E despreciable, el del flujo \mathcal{N} debe ser casi nulo. Habiendo un flujo tan

pequeño en los núcleos del transformador, no habrá en ellos pérdidas magnéticas, y, por lo tanto, la potencia consumida por el transformador al funcionar en corto circuito será igual a las pérdidas en el cobre de sus devanados, ya que es lo único que consume energía.

Para medir las pérdidas en corto circuito, se prepara un montaje parecido al de la figura 27; pero dando media vuelta al transformador para que en lugar de entrar la corriente por el circuito de baja entre por el lado de alta; además, los bornes de la baja deben unirse por un conductor sin resistencia.

La tensión aplicada al transformador debe empezar muy débil para poderla aumentar hasta que los amperímetros A_1 , A_2 y A_3 indiquen la corriente correspondiente a la plena carga del transformador. Las indicaciones de los vatímetros B_1 y B_2 , nos darán la potencia perdida en el cobre del transformador.

Cuando el transformador tiene la corriente de alta muy pequeña y los amperímetros A_1 , A_2 , A_3 no son lo bastante sensibles para medirla, debe instalarse un amperímetro en el corto circuito de la baja, para medir con él la corriente de este circuito, siempre mayor y más fácil de medir con aparatos poco sensibles.

La tensión que ha sido necesario aplicar a los bornes del transformador para medir las pérdidas en el cobre, es la llamada *tensión de corto circuito*, que, en los transformadores modernos, solo vale de 3 a 4 por ciento de la tensión normal.

La potencia perdida en el cobre de un transformador, varía con la carga del mismo proporcionalmente a su cuadrado, y vale, por consiguiente, a media carga $\frac{1}{4}$, a un tercio de carga $\frac{1}{9}$ y a un cuarto de carga $\frac{1}{16}$ de la pérdida a plena carga.

Montaje reducido. — Midiendo las pérdidas en vacío y las pérdidas en corto circuito de un transformador trifásico con el montaje de la figura 27, hace falta emplear tres amperímetros y dos vatímetros; pero el número de vatímetros y de amperímetros se puede reducir a uno, combinándolo con un conmutador inductor especial según el montaje de la figura 28, que pertenece a una mesa de mediciones del Laboratorio de la Escuela Industrial de Linares, construída por nuestros alumnos del curso 1920 a 1921.

El conmutador inductor *D* es bifilar de dos direcciones y tiene sus horquillas unidas posteriormente en circuito corto por una platina de cobre elástico provista de un pitón, *m* y *n*, que atraviesa la cara anterior. Al cerrar el conmutador, sobre uno u otro lado, su mango aprieta el pitón, *m* o *n*, y hace separar la platina correspondiente abriendo el corto circuito. De las palancas del conmutador parten los conductores que llevan la corriente al amperímetro *A* y al circuito amperimétrico del vatímetro *B*.

El conmutador *D*, cerrado sobre el lado *m* introduce los aparatos *A* y *B* a la fase 1, y cuando se cierra sobre el lado *n*, los introduce en la fase 2. De este modo se pueden leer las corrientes de dos

fases y las dos indicaciones del vatímetro cuya suma equivale a la potencia total (tomo XVIII, capítulo VI). El conmutador *F* facilita la medición de la tercera corriente; en efecto, estando tal

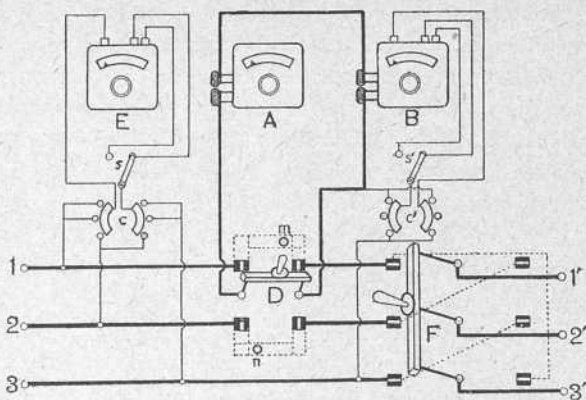


Fig. 28

conmutador cerrado a la izquierda, el amperímetro *A* mide las corrientes de la fase 1' y 2', y cerrando el conmutador *F* a la derecha, podrá medir la corriente de la fase 3', al introducirlo en el lado *n* del conmutador *D*.

El voltímetro *E* tiene dos escalas (150 y 300 voltios) y trabaja sobre una u otra según la posición del conmutador *s*. El conmutador voltimétrico *c*, está combinado para poder medir las tensiones de las tres fases.

El vatímetro *B* tiene las mismas escalas que el voltímetro y para cambiarlas tiene su conmutador *s'*. El inversor *c'* sirve para cruzar los hilos voltimétricos del vatímetro cuando la aguja de éste se desvía al revés.

Rendimientos. — *Método directo.* — Para saber el rendimiento de un transformador bastaría medir por medio de vatímetros la potencia total, consumida en el primario, y la potencia útil, producida en el secundario; con estas mediciones y la fórmula [12] hallaríamos el rendimiento del transformador.

Este método tan sencillo tiene el inconveniente de que, al encontrar un mal rendimiento, no descubre la parte deficiente del transformador. Además, un pequeño error cometido al medir las potencias, influye enormemente en el valor hallado por el rendimiento; mientras en el método de pérdidas separadas los errores cometidos influyen muy poco en la determinación del rendimiento.

Para comprobar lo dicho, vamos a poner un ejemplo:

Sea un transformador de 100 kw., potencia total, y rendimiento 95 %.

Al determinar el rendimiento por el método directo, deberíamos leer, en el primario 100 kw. y en el secundario 95 kw.; la fórmula [12] nos daría

$$\rho = \frac{95}{100} = 0'95;$$

pero, si al medir las potencias, total y útil, se comete un error de uno por % en más y en menos;

en lugar de 100 y 95, leeríamos 101 y 94'05 kw., y el rendimiento resultaría:

$$\rho = \frac{94'05}{101} = 0'931.$$

Empleando el método de pérdidas separadas, lo único que debe medirse es la potencia perdida, que debería ser igual a 5 kw. y el rendimiento, según la fórmula [14], sería

$$\rho = \frac{100 - 5}{100} = 0'95$$

Si al leer la potencia perdida se cometiere un error, por exceso, de dos ‰, en lugar de 5 kw. encontraríamos 5'1 kw., y con tal pérdida el rendimiento resultaría

$$\rho = \frac{100 - 5'1}{100} = 0'949$$

Como queríamos demostrar, en el método directo la diferencia de resultados, 0'95 y 0'931, es muy notable; en cambio, siguiendo el método de pérdidas separadas el error cometido no tiene importancia.

Método de pérdida separada. — Este método, además de la ventaja que acabamos de demostrar, tiene también la de que separa las pérdidas del transformador y así analiza sus defectos. Se funda en las fórmulas [13] ó [14], según se parte de la potencia útil o de la total.

En el transformador estático de tensión, no hay más pérdidas que las magnéticas y las del cobre; unas y otras sabemos medirlas haciendo funcionar el transformador en vacío y en corto circuito. Pudiendo así conocer las pérdidas del transformador, será fácil determinar su rendimiento aplicando la fórmula conveniente.

EJEMPLO. *Un transformador trifásico, de la «Société Alsacienne» de construcciones mecánicas, tipo T H 420, de 450 K. V. A. a $\frac{13500}{390}$ voltios, $\frac{20}{385}$ amperios y 25 períodos; consume en vacío 6200 vatios, y en corto circuito 5600 vatios. Se desea saber cuáles son sus rendimientos para la plena carga, tres cuartos, media y un cuarto de carga, manteniendo el $\cos \varphi = 1$.*

Para la plena carga:

Potencia útil	450000 vatios
Pérdidas magnéticas	6200 »
» en el cobre.....	5600 »
Potencia total	461800 »

El rendimiento será

$$\rho = \frac{450000}{461800} = 0'974$$

Para tres cuartos de carga:

Potencia útil $\left(\frac{3}{4} 450000\right)$	338000 vatios
Pérdidas magnéticas	6200 »
» en el cobre $\left(\frac{9}{16} 5600\right)$	3150 »
Potencia total.....	347350 »

El rendimiento será

$$\rho = \frac{338000}{347350} = 0'973$$

Para media carga:

Potencia útil $\left(\frac{1}{2} 450000\right)$	225000 vatios
Pérdidas magnéticas	6200 »
» en el cobre $\left(\frac{1}{4} 5600\right)$	1400 »
Potencia total.....	232600 »

El rendimiento será

$$\rho = \frac{225000}{232600} = 0'967$$

Para un cuarto de carga:

Potencia útil, $\frac{1}{4} 450000$	112500 vatios
Pérdidas magnéticas	6200 »
» en el cobre, $\frac{1}{16} 5600$	350 »
Potencia total.....	119050

El rendimiento será

$$\rho = \frac{112500}{119050} = 0'945$$

Si en lugar de tener en el circuito de utilización un $\cos \varphi = 1$, se tiene un factor de potencia dis-

tinto de la unidad, el procedimiento a seguir, para la determinación de los rendimientos, sería el mismo; pero la potencia útil, que viene dada en kilovoltioamperios, debe multiplicarse por $\cos \varphi$ para tenerla en vatios.

Caída de tensión. — Cuando el secundario de un transformador suministra la corriente a un circuito no inductivo, $\cos \varphi = 1$, *el tanto por ciento de caída de tensión en el transformador, es igual al tanto por ciento de pérdida en el cobre.* Así, en el transformador TH 240, del ejemplo anterior, el tanto por ciento de caída, funcionando a un coseno $\varphi = 1$, sería:

Para la plena carga

$$100 : t \% :: 450000 : 56000$$

de donde

$$t \% = \frac{560000}{450000} = 1'24$$

Para los tres cuartos de carga

$$t \% = \frac{315000}{338000} = 0'93$$

Para media carga

$$t \% = \frac{140000}{225000} = 0'62$$

y para un cuarto de carga

$$t \% = \frac{35000}{112500} = 0'31$$



Cotejando los resultados obtenidos, se ve que las caídas de tensión son sencillamente proporcionales a las cargas, puesto que para media carga el tanto por ciento, 0'62, resulta la mitad del de plena carga, 1'24.

Cuando el circuito de aprovechamiento tiene un $\cos \varphi$ distinto de la unidad, el tanto por ciento de caída de tensión resulta mayor, pudiendo ser calculado por la fórmula

$$t \% = e_r \cos \varphi + \sqrt{e_c^2 - e_r^2} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}$$

en la cual e_r representa el tanto por ciento de caída en circuito no inductivo; y e_c , el tanto por ciento de tensión de corto circuito.

Generalmente, las casas constructoras acostumbran a dar el tanto por ciento de caída para $\cos \varphi = 1$ y para $\cos \varphi = 0'8$. Con este último valor del $\cos \varphi$, la fórmula anterior se convierte en

$$t \% = 0'8 e_r + 0'6 \sqrt{e_c^2 - e_r^2}$$

Como ejemplo, vamos a calcular el tanto por ciento de caída de tensión en el mismo transformador *TH 420*, al funcionar con el $\cos \varphi = 0'8$, sabiendo que el tanto por ciento de tensión de corto circuito, medido al determinar las pérdidas en el cobre, es de 3'3.

Substituyendo valores en esta última fórmula resulta

$$t \% = 0'8 \times 1'24 + 0'6 \sqrt{3'3^2 - 1'24^2} = 2'82$$

Elevación de temperatura. — Funcionando el transformador a plena carga, el aumento de temperatura en sus carretes no debe exceder nunca de 70 grados, medido por el procedimiento de variación de resistencia (cap. II, fórmula [5]). La elevación de temperatura debe referirse, en refrigeración natural, a la temperatura del aire ambiente tomada a un metro de distancia y aproximadamente a la mitad de la altura del transformador; y en refrigeración por agua, a la temperatura del agua tomada en la entrada del transformador.



CAPÍTULO VI

PRUEBA DE ALTERNADORES

Características más notables del alternador. —

El funcionamiento de un alternador se estudia gráficamente, como se estudiaba el de la dínamo, mediante el trazado de curvas que reciben el nombre de características. Las más importantes de estas curvas, son:

La característica en circuito abierto.

La característica de corto circuito.

La característica de excitaciones.

La característica de pérdidas magnéticas.

La característica de pérdidas en el cobre inducido.

La característica de rendimientos.

Característica en circuito abierto. Su definición y determinación. — La característica interna o en circuito abierto, es la curva representativa de los distintos valores de la fuerza electromotriz inducida por las diferentes corrientes inductoras de un alternador, funcionando éste con velocidad constante.

Para la determinación experimental de la característica en circuito abierto de un alternador, se hace mover esta máquina (*A*, fig. 29), mediante un motor de corriente continua *M* que pueda regular fácilmente su velocidad; estando unidas ambas máquinas por un embrague elástico o por una correa sin fin.

El alternador se excita con corriente continua de un generador exterior, y para poder variar y medir

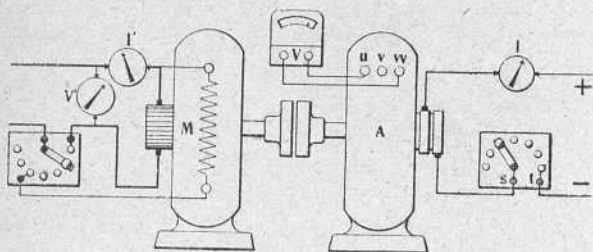


Fig. 29

esta corriente, se intercala en el circuito inductor un reóstato *st* y un amperímetro *I*.

Funcionando el alternador en circuito abierto, su fuerza electromotriz inducida es igual a la diferencia de tensión, y para medirla bastará derivar un voltímetro de los dos bornes del inducido si el alternador es monofásico, y de dos bornes cualesquiera, *u*, *v*, *w*, en caso de alternador trifásico, comprobando antes si la diferencia de tensión es la misma en todas las fases.

Para cada valor de la corriente inductora, leído

en I , se tendrá una tensión distinta en los bornes del inducido, y las indicaciones simultáneas del amperímetro y del voltímetro corresponderán a las abscisas, y ordenadas de la característica, cuyos valores trasladados a los ejes OA y OB (fig. 30)

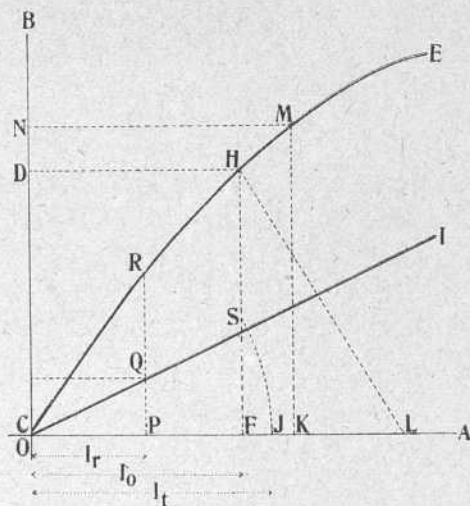


Fig. 30

determinan los puntos de la curva CE , cuya unión produce la característica.

Si los experimentos se hacen con valores crecientes de la corriente inductora y se repiten luego con valores decrecientes de la misma corriente, encontraremos una segunda serie de ordenadas mayores que las de la primera, debido a la histeresis de los núcleos inductores. Este fenómeno nos

indica que, *al trazar la característica interna, debemos tomar los valores de la corriente inductora, siempre crecientes o siempre decrecientes, para que los puntos hallados correspondan a una misma curva.*

Si la tensión normal del alternador es igual a DO (fig. 30), encontraremos la corriente de excitación en vacío, trazando la paralela DH al eje OA , hasta encontrar a la curva, y su longitud $DH = OF$ nos dará la corriente de excitación I_0 , para la tensión normal sin carga.

Característica de corto circuito. — La característica de corto circuito para un alternador, es el gráfico que relaciona los valores de la corriente inducida con los de la corriente inductora cuando el circuito exterior carece de resistencia y de auto-inducción.

Para su determinación experimental se dispone el mismo montaje de la figura 29; pero en lugar de unir los bornes del inducido con un voltímetro, se unen a un amperímetro por medio de conductores gruesos y cortos para que su resistencia sea nula. Este amperímetro nos medirá la corriente inducida, mientras el amperímetro I nos indicará el valor de la corriente inductora. Cuando el alternador sea trifásico como el A de la figura 29, debe unirse el borne v , libre de las comunicaciones del amperímetro, con uno cualquiera de los otros, u o w , por medio de un conductor sin resistencia, para que todas las fases queden en corto circuito.

El reóstato st sirve para variar la corriente in-

ductora y así poder tomar, para la característica, todos los puntos que convengan. Dibujada la característica de corto circuito resulta la recta OI de la figura 30, cuyas ordenadas representan las corrientes del inducido mientras las abscisas figuran las corrientes de excitación.

Para una corriente inducida PQ corresponde una corriente inductora $OP = I$, la cual produce el flujo necesario para vencer la caída interior y el flujo de reacción debidos a la corriente PQ .

Característica de excitaciones. — La característica CE puede darnos la corriente de excitación necesaria para tener una tensión determinada sin corriente, funcionando el alternador en vacío. En la característica OI , podemos buscar la excitación precisa para compensar la reacción del inducido, producida por una corriente de carga bien determinada. Si el flujo de reacción y el de excitación fuesen concordantes, de igual dirección y sentido, resultaría fácil buscar la corriente de excitación necesaria para determinada tensión y corriente; pero la discordancia de flujos hace difícil dicha operación.

Varios han sido los métodos ideados para deducir la corriente de excitación en carga; pero no se ha dado ninguno que sea completamente exacto; por eso, sólo vamos a detallar dos métodos que son los más sencillos, aunque no sean los más exactos. En todos ellos debe considerarse el valor del $\cos \varphi$ del circuito alimentado por el alternador, ya que la excitación de éste debe variar notablemente según

el desfase de la corriente inducida respecto a la tensión.

Generalmente se deducen las corrientes inductoras para los estados límites del factor de potencia, que son: para $\cos \varphi = 1$, caso más favorable, y para $\cos \varphi = 0.8$, caso más desventajoso.

Método de composición de corrientes. — Sea HF (fig. 30) la tensión normal, que conviene mantener constante para todas las corrientes; esta tensión necesita una corriente inductora I_o , *excitación en vacío*. Si la corriente de carga vale PQ , la corriente de excitación precisa para compensar la reacción del inducido, será I_r , *excitación de corto circuito*. La corriente inductora total I_t para la tensión HF y la corriente PQ , debe estar compuesta de I_o e I_r ; su valor puede calcularse por las fórmulas siguientes:

Para $\cos \varphi = 1$

$$I_t = \sqrt{I_o^2 + I_r^2}$$

Para $\cos \varphi = 0.8$

$$I_t = \sqrt{I_o^2 + I_r^2 + 1.2 I_o I_r} ;$$

Para un $\cos \varphi$ cualquiera

$$I_t = \sqrt{I_o^2 + I_r^2 + 2 I_o I_r \text{ sen } \varphi}$$

Gráficamente, puede determinarse I_t como sigue:

Para $\cos \varphi = 1$:

En la figura 30, sobre HF , se toma una longitud FS igual a I_r , y haciendo centro en O , se traza

un arco de circunferencia SJ ; la longitud OJ representa la corriente I_t .

Para un $\cos \varphi$ cualquiera:

Sobre una recta OA (fig. 31) se toma una longitud OF , igual a I_o ; por el punto F se traza una recta FD que forme con FA un ángulo φ , y por el mismo punto se levanta una perpendicular a la recta FD ; sobre ella se toma una longitud FP ,

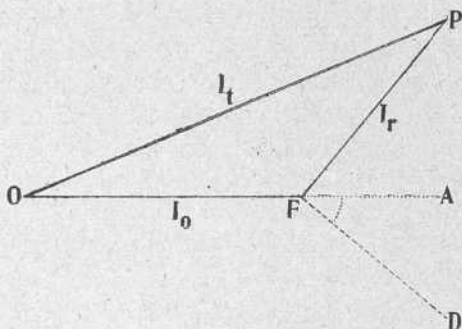


Fig. 31

igual a I_r , y la distancia OP es la corriente I_t que se busca.

El método de composición de corrientes no es exacto, porque en él se supone que las tensiones son sencillamente proporcionales a las excitaciones, es decir, que con doble corriente inductora resultaría doble tensión inducida, para lo cual sería necesario que la curva CE de la figura 30 fuese una recta.

En el primer tramo de la característica en vacío, se tiene la línea casi recta, de manera que para

puntos muy próximos al origen O el método de composición de corrientes dará soluciones muy aproximadas; pero estos resultados saldrán deficientes para los puntos situados cerca del codo de la curva.

Por todo lo que antecede debemos recomendar el método de composición de corrientes sólo para alternadores poco saturados.

Método de composición de tensiones. — La corriente I_o (fig. 30) produce una tensión HF que representaremos por E_o ; y la corriente I_r induce una tensión RP que vamos a representar por E_r . La corriente I_t debe inducir una tensión E_t que sea la resultante de E_o y E_r ; su valor puede calcularse por las siguientes fórmulas:

Para $\cos \varphi = 1$:

$$E_t = \sqrt{E_o^2 + E_r^2};$$

Para $\cos \varphi = 0'8$:

$$E_t = \sqrt{E_o^2 + E_r^2 + 1'2E_oE_r};$$

Para un $\cos \varphi$ cualquiera:

$$E_t = \sqrt{E_o^2 + E_r^2 + 2E_oE_r \cos \varphi}$$

Conocido E_t podemos tomar sobre el eje OB (fig. 30), una longitud ON igual a su valor, y trazando por N una paralela, al eje OA , hasta cortar a la curva, su magnitud $NM = OK$ representa la corriente I_t que se busca.

Para aplicar gráficamente este método, puede procederse como sigue:

Para $\cos \varphi = 1$:

Sobre el eje OA (fig. 30) se toma un segmento FL , igual a RP ; y uniendo L con H resulta la recta HL igual a E_t . Conocido éste, se procede como en el caso anterior para determinar I_r .

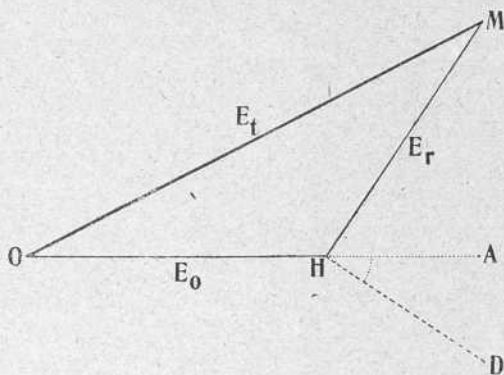


Fig. 32

Para un $\cos \varphi$ cualquiera:

Sobre una recta OA (fig. 32) se toma una longitud OH , igual a E_0 ; por el punto H se traza una recta HD que forme un ángulo φ con la OA , y por el mismo punto se levanta una perpendicular a la recta HD ; sobre ella se toma una longitud HM , igual a E_r , y la distancia OM es la tensión E_t que se busca.

El método de composición de tensiones tiene el mismo inconveniente que el de composición de

corrientes, sus soluciones sólo son aproximadas en los alternadores poco saturados; pero así como en el método de corrientes *el error cometido era por defecto*, en el método de tensiones *se comete un error por exceso*.

Pudiendo deducir las corrientes inductoras en carga por uno cualquiera de los métodos detallados,

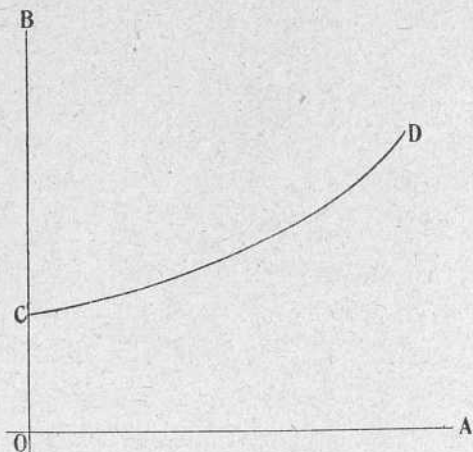


Fig. 33

es fácil determinar *la característica de corrientes de excitación*, en función de la corriente de carga y para un $\cos \varphi$ constante. En efecto, si sobre el eje OA de la figura 33, se toman longitudes equivalentes a las corrientes de carga, y sobre el eje OB se buscan las corrientes inductoras correspondientes, resultará la característica representada por la línea CD .

Característica de pérdidas magnéticas. — La característica de pérdidas en el hierro, es la curva que da las pérdidas de histeresis y de Foucault en función de la corriente de excitación.

Los datos necesarios para el trazado de esta característica, pueden tomarse simultáneamente con los de la característica en vacío. Para eso, se intercala el amperímetro I' y el voltímetro V' en el circuito de motor M (fig. 29), con estos aparatos se mide la potencia total consumida por el motor en cada punto de la característica interna. Estando M calibrado, conoceremos su rendimiento que multiplicado por la potencia total nos dará el gasto del alternador A . Funcionando éste en circuito abierto, su gasto se reduce a las pérdidas magnéticas y mecánicas. Estas últimas son constantes, por funcionar el alternador a velocidad invariable, y podremos conocerlas midiendo la potencia consumida por A cuando no esté excitado. Para tener las pérdidas magnéticas correspondientes a cada corriente inductora, basta restar de la potencia absorbida por el alternador sus pérdidas mecánicas.

Los valores de la corriente inductora y de las pérdidas magnéticas, nos darán los puntos para el trazado de la característica.

Característica de pérdidas en el cobre inducido. — En el devanado del inducido de un alternador se producen pérdidas por el efecto Joule de la corriente de carga, y pérdidas debidas a corrientes parásitas. El gráfico que representa los valores de

estas pérdidas en función de la corriente de carga, es la característica de pérdidas en el cobre inducido.

Los datos para el trazado de esta característica se toman simultáneamente con los de la característica de corto circuito midiendo, al mismo tiempo que las corrientes de excitación y de carga, la potencia consumida por el motor M , para con ella poder buscar el gasto del alternador. Funcionando éste en corto circuito, sin tensión disponible, sus pérdidas magnéticas son casi nulas y no tendrá más gasto que el producido por las pérdidas en el cobre del inducido y las pérdidas mecánicas de rozamiento y ventilación. Si durante la prueba se mantiene la velocidad constante, las pérdidas mecánicas serán las mismas en todo el ensayo y siendo ya conocidas podremos restarlas del gasto del alternador y tener las pérdidas del cobre para cada valor de la corriente de carga.

Característica de rendimientos. — El rendimiento de un alternador depende del desfasaje entre su corriente y su tensión, porque, según hemos visto en la característica de excitaciones, al disminuir el factor de potencia debe aumentar la corriente de excitación y con ella aumenta las pérdidas magnéticas que harán disminuir el rendimiento; por eso, cuando se quiere determinar la curva de rendimientos de un alternador, se escoge un $\cos \varphi$ que se mantiene constante en todo el ensayo.

Generalmente se trazan, para cada alternador, dos curvas de rendimientos; una para el $\cos \varphi = 1$

que podríamos llamar curva *optimista*; y otra con el $\cos \varphi = 0'8$, que sería la curva *pesimista*. Así el rendimiento del alternador estará siempre comprendido entre los valores dados por las dos curvas.

El procedimiento empleado para buscar los puntos de la característica de rendimientos, es el de pérdidas separadas, que consiste en buscar las pérdidas de la máquina para cada potencia útil y añadirlas a ésta para tener la potencia total.

La potencia útil de un alternador es calculable por las fórmulas:

En los alternadores monofásicos

$$W_u = VI \cos \varphi \quad [24]$$

En los alternadores trifásicos

$$W_u = 1'73 VI \cos \varphi \quad [25]$$

Funcionando el alternador a tensión V constante, y haciendo el $\cos \varphi$ también constante en la determinación del rendimiento, bastará atribuir valores a la corriente de carga I para hacer variar la potencia útil dada por las fórmulas.

Las pérdidas de un alternador pueden descomponerse en las partes siguientes:

Pérdidas mecánicas.

Pérdidas de histeresis y Foucault.

Pérdidas del cobre inducido.

Pérdidas del cobre inductor.

Las pérdidas mecánicas han sido medidas al determinar la característica magnética.

Las pérdidas de histeresis y Foucault se buscan en la característica magnética, después de haber buscado en la curva de excitaciones (fig. 33), la excitación correspondiente a la corriente de carga y al $\cos \varphi$ del alternador.

Las pérdidas en el cobre del inducido, se buscan en la curva de estas pérdidas sabiendo la corriente de carga.

Las pérdidas en el cobre inductor se obtienen, midiendo la resistencia de sus carretes y aplicando la fórmula de Joule [17] a dicha resistencia y a la corriente inductora dada por la curva de excitaciones.

La suma de todas estas pérdidas será la potencia total perdida, conocida la cual puede calcularse el rendimiento por la fórmula [13]

$$\rho = \frac{W_u}{W_u + W_p}$$

Medida directa del rendimiento de un alternador. — Con menos precisión que por el método de pérdidas separadas, puede medirse el rendimiento de un alternador moviéndolo, a la velocidad normal, mediante un motor calibrado, para poder saber la potencia que consume, y midiendo con vatímetros la potencia útil del alternador cargado en su propio circuito. El cociente entre la potencia útil y la consumida nos dará, según la fórmula [12], el rendimiento del alternador para la carga que tenga.

Si no se dispone de un motor calibrado, puede utilizarse el mismo que tenga el alternador, cual-

quiera que sea su clase; y para medir la potencia consumida por el alternador (después de haber tomado los datos de su potencia útil), se desembarga y se carga el motor con un freno dinamométrico (cap. III), hasta que tenga la misma velocidad, tensión y gasto, que tenía unido al alternador; la potencia útil dada por el freno será la potencia total del alternador para la carga medida.

Si el alternador funciona como motor sincrónico (tomo VII, cap. IV), puede determinarse su rendimiento, cargando el motor con un freno dinamométrico, para medir así la potencia útil producida, los vatímetros instalados a la entrada del motor nos darán la potencia consumida, y aplicando la fórmula [12] tendremos el rendimiento.

Cuando el motor sincrónico forma parte de un grupo convertidor (tomo VIII, cap. IX), podrá medirse el rendimiento compuesto del grupo, midiendo la potencia útil producida por el generador, y la potencia total consumida por el motor, su cociente será el rendimiento buscado.

Rigidez dieléctrica. — El aislamiento de un alternador se comprueba, sometiendo sus partes eléctricas y la masa a una tensión alterna que tenga de dos a cinco veces la tensión normal. Esta prueba se efectúa estando la máquina caliente, y debe prolongarse un minuto. La disposición que se adopta para esta prueba es la misma representada en la figura 23.



CAPÍTULO VII

PRUEBA DE MOTORES ASINCRÓNICOS

Campos giratorios y velocidades. — Los motores asincrónicos, estudiados en el tomo VII de esta Biblioteca, quedaron clasificados en dos grupos que son: motores de campo giratorio y motores de campo alternativo. La diferencia esencial entre los dos grupos consiste en que los primeros son polifásicos y los segundos monofásicos.

En el estátor de un motor asincrónico polifásico se produce un campo magnético, bipolar o multipolar, giratorio y cuya velocidad es sincrónica con la del alternador de la central alimentadora.

En el motor asincrónico monofásico se produce un campo magnético alternativo y fijo, que puede suponerse formado por dos campos rotatorios iguales y de sentido contrario (tomo II, pág. 103); según esta suposición, en el motor monofásico podemos considerar su campo giratorio de igual velocidad que el del motor polifásico.

Las espiras del rotor, situadas en el seno del campo magnético producido por el estátor, están sometidas a un flujo variable, por ser giratorio el

campo, que induce en ellas corrientes eléctricas, convirtiéndolas en circuitos movibles que deben orientarse buscando el máximo de flujo por su cara sur (tomo I, pág. 119); pero, siendo rotatorio el campo, las espiras deben girar continuamente en su afán de alcanzar el máximo deseado. Este afán es tanto mayor cuando más grande es el número de espiras y la corriente en ellas inducida.

Para que aumente la potencia del rotor, o el afán en moverse, debe aumentar la corriente inducida en sus espiras, y esto se consigue haciéndose mayor la variación del flujo.

Si el rotor girase a igual velocidad que el campo rotatorio, no habría variación de flujo ni corriente en sus espiras, pues estaríamos en el mismo caso de una dínamo excitada y con el rotor fijo. Para tener variación, debe haber cierto desplazamiento continuo entre las espiras inducidas y el campo, lo cual se consigue marchando el rotor a distinta velocidad que el campo giratorio.

Cuanto mayor sea la diferencia entre la velocidad del rotor y la del campo, más grande será la variación de flujo y mayor la potencia nacida en el rotor.

Al aumentar la carga de un motor asincrónico, disminuye la velocidad de su rotor, con lo cual crece la potencia mecánica producida en él; pero, al mismo tiempo, y para que exista equilibrio, debe aumentar la potencia eléctrica consumida por el estátor.

La velocidad del campo giratorio de un motor asincrónico, depende del número de pares de polos que tenga p y de la frecuencia f de la corriente in-

ductora. El número de revoluciones n_1 , que el campo da por minuto, se calcula por la fórmula

$$n_1 = \frac{60 f}{p} \quad [26]$$

EJEMPLO. *¿Qué velocidad tendrá el campo giratorio de un motor asincrónico de 8 polos, alimentado por una corriente de 50 períodos?*

$$n_1 = \frac{60 \times 50}{4} = 750 \text{ revoluciones}$$

Las revoluciones del rotor, siempre menores que las del campo, las representaremos por n_2 ; y restadas de n_1 , nos darán las vueltas perdidas por el rotor en un minuto o sea, la llamada velocidad relativa que la representaremos por n , y se calcula por la fórmula:

$$n = n_1 - n_2 \quad [27]$$

Deslizamiento. — El cociente entre la velocidad relativa y la del campo giratorio, es lo que se llama coeficiente de deslizamiento, y viene dado por una cualquiera de las expresiones siguientes:

$$s = \frac{n}{n_1} \quad [28]$$

$$s = 1 - \frac{n_2}{n_1} \quad [29]$$

Podríamos aplicar la fórmula [28], midiendo la frecuencia de las corrientes inductora e inducida,

y tomando estas frecuencias en lugar de las revoluciones, puesto que por ser unas y otras directamente proporcionales, sus cocientes serán iguales.

La frecuencia de la corriente inductora se mide directamente con un frecuencímetro de Framm (tomo XVIII, cap. VII).

La frecuencia de la corriente inducida sólo puede ser medida cuando el rotor tenga el devanado de fases abiertas; su medición se efectúa derivando un galvanómetro de los anillos del colector y contando el número de oscilaciones que la aguja dé en un segundo.

Para aplicar la fórmula [29], debe medirse el número de revoluciones del rotor por medio de un tacómetro (cap. III), y calcular las vueltas del campo giratorio por la fórmula [26], después de medida la frecuencia de la corriente inductora con el frecuencímetro de Framm.

EJEMPLO. Un motor asincrónico de 6 polos, funciona con corriente de 42 períodos, y se desea saber qué coeficiente de deslizamiento tiene al girar su rotor con 798 revoluciones por minuto.

La velocidad del campo giratorio debe ser

$$n_1 = \frac{60 \times 42}{3} = 840 \text{ revoluciones}$$

y el deslizamiento será

$$s = 1 - \frac{798}{840} = 0'05$$

o sea, igual a un cinco por ciento.

Otro método empleado para medir el deslizamiento es el llamado *estroboscópico*, fundado en un fenómeno de óptica.

Para aplicarlo se prepara un disco de cartón y se divide su círculo en un número de sectores doble que el de polos del motor, pintando de negro los sectores de lugar par y blanqueando los de lugar impar. El disco, así preparado se pega a un extremo del eje del rotor, para que gire con él, y se ilumina fuertemente por medio de un arco voltaico derivado de la misma red que alimenta al motor.

El arco, alimentado por la corriente alterna, se apaga y enciende tantas veces como alternancias tenga la corriente, doble que el número de períodos, permaneciendo apagado durante los mínimos de corriente y encendido sólo en los máximos; de modo que las emisiones de luz se producen periódicamente a intervalos de medio período.

Si el rotor girase a la velocidad de sincronismo n_1 , en cada medio período giraría un paso polar y los sectores del disco avanzarían dos divisiones; de modo que el lugar ocupado por la estrella de sectores negros al final de cada semiperíodo sería el mismo. Estando el disco alumbrado por el arco a intervalos de medio período, sólo veremos la estrella de sectores negros en el instante que esté iluminada y si ésta emplea el tiempo que está a oscuras para avanzar un paso polar, nos producirá la impresión de que el disco está inmóvil. En cambio si el motor gira con una velocidad menor que la del sincronismo, los sectores del disco se irán retrasando respecto a las emisiones de luz, y produ-

cirán la impresión de que giran en sentido contrario al de rotación del motor.

Observando siempre un mismo sector, se puede contar las vueltas que dé por minuto, cuyo número será la velocidad relativa n del inducido. Con esta velocidad y la frecuencia de la corriente inductora, se puede calcular el deslizamiento por la fórmula [28]

Potencia total y partes en que se descompone. —

La potencia eléctrica total W_t consumida por el estátor de un motor asincrónico, responde a las fórmulas [24] o [25], según sea monofásico o trifásico el motor. En caso de motor bifásico, la potencia es el doble que para los monofásicos.

Una gran parte de la potencia consumida por el estátor se transforma y, por inducción, pasa al rotor; pero una fracción de ella se pierde en calentar el cobre inductor W_c y el hierro de la armadura del estátor W_h .

La parte de potencia transformada en el rotor, se descompone en: pérdidas del cobre inducido w_c ; potencia mecánica útil, W_u ; y pérdidas por rozamientos, m .

La potencia total, en virtud del principio de conservación de la energía, debe ser igual a la suma de todas las partes en que se disgrega; según esto, y como resumen, podemos escribir la siguiente igualdad:

$$W_t = \underbrace{m + W_h}_{\text{pérdidas en el estátor}} + \underbrace{W_c + w_c}_{\text{pérdidas en el rotor}} + W_u \quad [30]$$

o bien

$$W_t = W_v + W_{cc} + W_u \quad [31]$$

La fórmula [31] es una transformación de la [30] que resulta al substituir la suma de las pérdidas mecánicas m y magnéticas W_h por la llamada *potencia en vacío* W_v y la suma de pérdidas en los bobres de inducido e inductor por la potencia *de corto circuito* W_{cc} .

Medida de la potencia en vacío. — Para medir W_v , se dispone un montaje como el preparado en la figura 27 (pág. 102) para los transformadores. En ella, u, v, w , representará, ahora, el devanado del estátor; y U, V, W , las fases del rotor. Los amperímetros A_1, A_2, A_3 , servirán para medir las corrientes por fase; los vatímetros B_1 y B_2 nos darán la potencia eléctrica consumida; y el voltímetro E podrá comprobar la tensión de los tres puentes.

Preparado este montaje para la medición, se pone en marcha el motor asincrónico y se deja funcionar sin carga. Con el voltímetro E se mide la tensión en los bornes del motor y después de comprobado el voltaje de los tres puentes, se quita el voltímetro de circuito para leer en seguida y simultáneamente las desviaciones de los dos vatímetros, que sumadas nos darán la potencia eléctrica consumida por el motor marchando sin carga. En los amperímetros A_1, A_2, A_3 , se pueden leer las tres *corrientes en vacío* que deben ser sensiblemente iguales.

Funcionando el motor sin carga, su potencia útil W_u será nula, como también la velocidad relativa del rotor; no habiendo deslizamiento no se inducirá corriente en las espiras del rotor y no habrá pér-

dida en su cobre, de modo que será nula w_c ; además las corrientes en vacío son muy pequeñas y las pérdidas en el cobre inductor W_{vc} , muy inferiores a las de carga W_c y casi despreciables. Por el contrario, las pérdidas mecánicas son las de carga, por rodar el motor a toda velocidad, y también las pérdidas magnéticas son normales, porque la tensión, y con ella el flujo, son los mismos que en carga. De todo lo que antecede se deduce que la fórmula [30] de la potencia total, aplicada al funcionamiento sin carga, debe reducirse a

$$W_t = m + W_h + W_{vc}$$

Si se desprecia el valor de W_{vc} , puede admitirse la siguiente igualdad

$$W_t = m + W_h = W_v$$

según la cual podrá medirse la pérdida mecánica y magnética midiendo la potencia absorbida por el motor funcionando sin carga.

Si no se quiere despreciar W_{vc} , puede calcularse su valor midiendo la resistencia de las fases del estátor y aplicando la fórmula del efecto Joule [17] a las corrientes en vacío.

EJEMPLO. Vamos a referir todos los casos de este capítulo, a un motor trifásico de 25 HP, 200 voltios, 67'5 amperios, 1500 revoluciones en vacío y 50 períodos. Las fases del estátor están conectadas en estrella, y su resistencia compuesta medida por el método de caída óhmica (cap. I), es de 0'1224 ohmios.

Efectuado el ensayo en vacío, siguiendo las instrucciones dadas, arroja los datos siguientes:

Revoluciones	Voltios	Amperios			Vatios		
		A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	Totales
1500	200	16'5	16'5	16'5	+ 2180	- 1070	1110

Cálculo de W_{vc}:

La resistencia por fase, estando éstas conectadas en estrella, será la mitad de la compuesta, o sea,

$$\frac{0'1224}{2} = 0'0612 \text{ ohmios}$$

El efecto Joule (fórmula [17]), será, para cada fase,

$$W_j = 0'0612 \times 16'5^2 = 16'67 \text{ vatios}$$

y las tres fases juntas producirán una pérdida

$$W_{vc} = 3 \times 16'67 = 50 \text{ vatios}$$

Pérdidas magnéticas y mecánicas:

Descontando de la potencia total medida las pérdidas del cobre, tendremos las pérdidas del hierro y de rozamiento, que serán

$$W_k + m = 1110 - 50 = 1060 \text{ vatios}$$

Factor de potencia en vacío:

La fórmula [25] nos da el medio de calcular el valor del $\cos \varphi$, en vacío, ya que despejando en ella $\cos \varphi$ y aplicando los datos del ensayo sin carga, resulta

$$\cos \varphi = \frac{W_t}{\sqrt{3} VI} \quad [32]$$

$$\cos \varphi = \frac{1110}{1'73 \times 200 \times 16'5} = 0'194$$

Si en vez de tratarse de un motor trifásico se tratara de un monofásico, el factor de potencia debería despejarse de la fórmula [24] y resultaría

$$\cos \varphi = \frac{W_t}{VI}$$

Observación. Si el estátor, en lugar de tener las fases conectadas en estrella, las tuviese unidas en triángulo, la marcha para el cálculo de W_{ec} sería como sigue:

La resistencia por fase debe ser los tres medios de la resistencia compuesta, o sea,

$$\frac{3}{2} 0'1224 = 0'1836 \text{ ohmios}$$

La corriente por fase sería, sólo de

$$\frac{16'5}{\sqrt{3}} = 9'55 \text{ amperios}$$

La pérdida por fase

$$W_1 = 0'1836 \times 9'55^2 = 16'67 \text{ vatios}$$

y la total, en las tres fases

$$W_{uc} = 3 \times 16'67 = 50 \text{ vatios}$$

Medida de la potencia de corto circuito. — Con el mismo montaje de la figura 27, se efectúa el ensayo para medir la potencia de corto circuito en los motores asincrónicos. La operación se lleva de la manera siguiente:

Estando las fases del inducido unidas en corto circuito, como durante la marcha, y frenado el rotor para evitar su arranque, se aplica a los bornes del estator una tensión débil para aumentarla sucesivamente hasta hacer circular por las fases del motor la misma corriente de plena carga.

Sujeta la polea, a mano, se hace girar el rotor muy lentamente, para tener un promedio de la inducción mutua entre inducido e inductor, variable según la posición de los carretes de ambos devanados.

En los amperímetros A_1 , A_2 , A_3 , se miden las corrientes del inducido, cuya media aritmética debe ser igual a la corriente de carga; en el voltímetro E se mide el voltaje aplicado, que es conocido con el nombre de *tensión de corto circuito*; y después de retirado el voltímetro, se leen las desviaciones de los vatímetros para tener la potencia consumida.

Estando el motor en reposo, serán nulas las pérdidas mecánicas y la potencia útil; además, por

ser la tensión de corto circuito muy pequeña, el flujo es despreciable, lo mismo que las pérdidas magnéticas. En cambio, por los devanados de inducido e inductor circulan las mismas corrientes que en plena carga, y las pérdidas producidas por ellas, W_c y w_c , serán las correspondientes al funcionamiento en carga del motor.

Teniendo en cuenta lo que antecede, la fórmula [30] de la potencia total aplicada al funcionamiento en corto circuito y reposo del motor, debe convertirse en

$$W_t = W_c + w_c = W_{cc};$$

fórmula que nos dice claramente el procedimiento que se ha de seguir para la medición en grupo de las pérdidas por efecto Joule de los devanados.

EJEMPLO. En el mismo motor del ejemplo anterior, efectuado el ensayo de corto circuito, resultan los datos siguientes:

Revoluciones	Voltios	Amperios			Vatios		
		A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	Totales
0	43	67'6	67'5	67'4	+2110	-650	1460

Factor de potencia en el corto circuito. — La fórmula [32] aplicada al ensayo de corto circuito nos dará el valor del $\cos \varphi_{cc}$.

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{1460}{\sqrt{3} \times 43 \times 67'5} = 0'291$$

Corriente de corto circuito a plena tensión. — La corriente, en un circuito de impedancia constante, es directamente proporcional a la tensión aplicada; fundándonos en esta proporcionalidad, podemos calcular, por una simple regla de tres, la corriente I_{cc} que circularía por el estátor del motor, ensayado en las mismas condiciones de corto circuito, si en lugar de aplicar a sus bornes una tensión de 43 voltios pudiésemos aplicar la tensión normal de 200 voltios. En efecto, el planteo y solución del problema será

$$\begin{array}{l} 43 \text{ voltios dan } 67'5 \text{ amperios.} \\ 200 \text{ voltios darán } I_{cc} \text{ amperios.} \end{array}$$

de donde

$$I_{cc} = \frac{67'5 \times 200}{43} = 314 \text{ amperios}$$

Como se ve, este ensayo no es posible llevarlo a la práctica, pues la corriente que resulta es más que suficiente para quemar los devanados.

Potencia de corto circuito para distintas corrientes.

— La potencia perdida en el cobre de los devanados inductores e inducidos, varía como el cuadrado de la corriente que por ellos circula; es decir, que para una corriente doble, las pérdidas W_{cc} serían el cuádruple, y para una corriente triple, las pérdidas resultarían nueve veces mayores.

Esta sencilla relación nos permite buscar la pérdida W_{cc} debida a una corriente cualquiera, cuando se ha medido la pérdida producida por una co-

riente determinada; basta, para ello, formar una proporción entre las pérdidas y los cuadrados de las corrientes.

EJEMPLO. Nos conviene buscar las pérdidas de corto circuito, del motor ensayado, para las corrientes 35'3 y 25'4, amperios.

Para 35'3 amperios, formaremos la proporción

$$\frac{35'3^2}{67'5^2} = \frac{W'_{cc}}{1460}$$

de donde

$$W'_{cc} = \frac{1460 \times 35'3^2}{67'5^2} = 400 \text{ vatios}$$

y para 25'4 amperios resultará

$$W''_{cc} = \frac{1460 \times 25'4^2}{67'5^2} = 206 \text{ vatios}$$

Determinación del rendimiento por el método de pérdidas separadas. — Despejando la potencia útil W_u en la fórmula [31], resulta

$$W_u = W_t - W_v - W_{cc}$$

y aplicando este valor a la fórmula [12] del rendimiento, tendremos la siguiente igualdad

$$\rho = \frac{W_t - W_v - W_{cc}}{W_t} \quad [33]$$

preparada para calcular el rendimiento de un motor asincrónico, después de medida su potencia total y las pérdidas en vacío y de corto circuito.

Ya hemos visto en párrafos anteriores, cómo se medían W_v y W_{cc} ; ahora sólo nos falta estudiar

el procedimiento para medir la potencia total W_t .

Los aparatos de medición, amperímetros, voltímetros y vatímetros, se instalan lo mismo que, en la figura 27, para los ensayos en vacío y de corto circuito. El motor, en marcha ya, se carga, mediante freno eléctrico o dinamométrico, hasta que los amperímetros indiquen la corriente de plena carga; en seguida se mide el voltaje, las revoluciones y los vatios, *teniendo siempre presente que debe retirarse el voltímetro de circuito antes de leer las indicaciones de los vatímetros*, para que sus pérdidas no se sumen a la potencia del motor, dada por la suma de las indicaciones de B_1 y B_2 .

Cuando sólo interesa saber el rendimiento a plena carga, basta la medición hecha para buscar el valor del rendimiento en la fórmula [33]; pero, si conviene trazar la curva de rendimientos deben efectuarse varias mediciones de la potencia total, correspondientes a distintas cargas, para poder calcular los rendimientos del motor en cada una de ellas, y así tener la orientación de la característica.

EJEMPLO. Los ensayos en carga, del motor de referencia, arrojan los siguientes datos:

Revoluciones	Voltios	Amperios			Vatios		
		A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	Totales
1450	200	67'5	67'5	67'5	+ 13430	+ 7570	21000
1470	200	35'3	35,4	35'2	+ 7050	+ 3450	10500
1480	200	25'4	25'4	25'4	+ 4650	+ 600	5250

Para la corriente de plena carga, 67'5 amperios, resulta:

Potencia total	21000 vatios
Pérdidas magnéticas y mecánicas ..	1060 »
Pérdida en el cobre	1460 »

El rendimiento, según la fórmula [33],

$$\rho = \frac{21000 - 1060 - 1460}{21000} = 0'88$$

La potencia útil, en caballos, sería

$$\frac{W_t \times \rho}{736} = \frac{21000 \times 0'88}{736} = 25'1 \text{ HP}$$

El factor de potencia, según la fórmula [32],

$$\cos \varphi = \frac{21000}{\sqrt{3} \times 200 \times 67'5} = 0'90$$

y el deslizamiento, según la fórmula [29],

$$\rho = 1 - \frac{1450}{1500} = 0'033$$

Para la corriente de 35'3 amperios, resulta:

Potencia total	10500 vatios
Pérdidas magnéticas y mecánicas ..	1060 »
Pérdida en el cobre	400 »

$$\text{Rendimiento} = \frac{10500 - 1060 - 400}{10500} = 0'86$$

$$\text{Potencia útil} = \frac{10500 \times 0'86}{736} = 12'28 \text{ HP}$$

$$\cos \varphi = \frac{10500}{\sqrt{3} \times 200 \times 35'3} = 0'864$$

$$\text{Deslizamiento} = 1 - \frac{1470}{1500} = 0'02$$

Para la corriente de 25'4 amperios, resulta:

Potencia total	5250 vatios
Pérdidas magnéticas y mecánicas ..	1060 »
Pérdida en el cobre	206 »

$$\text{Rendimiento} = \frac{5250 - 1060 - 206}{5250} = 0'76$$

$$\text{Potencia útil} = \frac{5250 \times 0'76}{736} = 5'42 \text{ HP}$$

$$\cos \varphi = \frac{5250}{\sqrt{3} \times 200 \times 25'4} = 0'58$$

$$\text{Deslizamiento} = 1 - \frac{1480}{1500} = 0'013$$

Para resumir, podemos formar la tabla siguiente:

Amperios	W_t en vatios	W_u en HP	W_{cc} en vatios	Rendi- miento p %	Desliza- miento p %	$\cos \varphi$
67'5	21000	25'1	1460	88	3'3	0'90
35'3	10500	12'28	400	86	2	0'864
25'4	5250	5'4	206	76	1'3	0'58

Haciendo más mediciones en el ensayo de cargas, podríamos prolongar esta tabla y tener los datos suficientes para dibujar las curvas de potencia total, útil, pérdidas del cobre, rendimientos, deslizamientos y factor de potencia, todas en función de la corriente del estátor.

Método del deslizamiento. — Al buscar el rendimiento de un motor asincrónico por el método de pérdidas separadas, es menester efectuar el ensayo de corto circuito, para el cual debe disponerse de un alternador que pueda suministrar la tensión de corto circuito. Pocas veces se dispone de un generador que reuna esta condición y, para poder prescindir de él, se ha ideado el *método del deslizamiento*, que no requiere el ensayo de corto circuito.

En lugar de calcular el rendimiento por la fórmula [33], como en el método de pérdidas separadas, se parte de la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{n_2}{n_1} \left(1 - \frac{W_h + W_c}{W_t} \right) \quad [34]$$

que para aplicarla, basta medir:

W_t , n_2 y la corriente del estátor, en el ensayo de carga;

W_h , en el ensayo en vacío;

y la resistencia del estátor, para poder calcular W_c por la fórmula [17] del efecto Joule aplicada a la corriente de carga.

Como ejemplo vamos a aplicar este método al

motor ya ensayado por el método de pérdidas separadas.

Potencia total.....	21000 vatios
Pérdidas magnéticas y mecánicas	1060 »
Corriente de carga.....	67'5 amperios
Resistencia por fase	0'0612 ohmios
Pérdida por fase. $(0'0612 \times 67'5)^2 =$	278 vaticos
Pérdida en las tres fases	834 »
Revoluciones del rotor	1450
Revoluciones del campo giratorio	1500
Rendimiento	

$$\rho = \frac{1450}{1500} \left(1 - \frac{1060 + 834}{21000} \right) = 0'879$$

Resultado casi igual al obtenido por el método de pérdidas separadas; pudiéndose atribuir la diferencia a la poca aproximación de los cálculos.

Método directo. — Para determinar el rendimiento de un motor asincrónico sin recurrir a la medición de sus pérdidas, se puede adoptar el *método directo*, fundado en la fórmula [12], y que se reduce a medir la potencia eléctrica consumida por el motor, y la potencia mecánica útil que produce; la primera debe medirse por medio de vatímetros, y la segunda puede apreciarse con una dínamo calibrada o con un freno dinamométrico.

Para medir la potencia útil del motor, por medio de una dínamo calibrada, se aprovecha su energía mecánica en mover la dínamo, y ésta, se carga a un circuito provisto de amperímetro y voltímetro,

cuyas indicaciones dan la potencia útil por ella producida, que dividida por el rendimiento correspondiente, da el valor de la potencia que el motor suministra.

En vez de cargar el motor asincrónico con una dínamo calibrada, se puede cargar por medio de un freno dinamométrico, montado directamente en su eje o bien por transmisión, y midiendo su potencia útil por el procedimiento expuesto en el capítulo III.

Como ejemplo vamos a detallar el ensayo de un motor trifásico construido por *La Electra Industrial*, de Tarrasa, cuyas constantes son: Potencia 20 HP; Tensión, 220 voltios; Corriente, 49 amperios; Frecuencia, 50 períodos, y Velocidad, 1440 revoluciones.

Los datos del ensayo a plena carga son:

Revol. del motor	Voltios	Amperios	Vatios			Revol. del freno	Kg. del freno
			B ₁	B ₂	Totales		
1440	220	49	11750	+ 500	16750	1440	12'5

La palanca del freno es de 0'8 m.

Sus constantes serán:

$$\text{Para caballos} \dots \dots \dots \frac{2\pi \times 0'8}{60 \times 75} = 0'00112$$

$$\text{Para vatios} \dots \dots \dots \frac{2\pi \times 9'8 \times 0'8}{60} = 0'82$$

$$\text{La potencia útil } \left\{ \begin{array}{l} 0'00112 \times 1440 \times 12'5 = 20'1 \text{ HP} \\ 0'82 \times 1440 \times 12'5 = 14750 \text{ vatios} \end{array} \right.$$

$$\text{El rendimiento} \dots\dots\dots \frac{14750}{16750} = 0'882$$

$$\text{El factor de potencia} \dots\dots \frac{16750}{\sqrt{3} \times 220 \times 49} = 0'90$$

$$\text{El deslizamiento} \dots\dots\dots 1 - \frac{1440}{1500} = 0'04$$

Rigidez dieléctrica. — Los aislantes de un motor asincrónico, deben probarse por el mismo procedimiento que los de una dinamo, adoptando la disposición de la figura 23.

En motores de baja tensión, no superior a 500 voltios, el aislamiento del estátor debe resistir 1500 voltios durante un minuto, probado en caliente; y los aislantes del rotor se prueban a 1000 voltios, en iguales condiciones.

FIN DEL TOMO XIX

ÍNDICE

	<u>Páginas</u>
Formulario	5
Preliminares.....	9
CAPÍTULO I. — <i>Medición de resistencias.</i>	
Método de caída óhmica	13
Mediciones en máquinas de corriente continua	17
Mediciones en máquinas de corriente alterna.	19
Medida del aislamiento de una máquina ..	22
CAPÍTULO II. — <i>Elevación de temperatura.</i>	
Temperaturas	24
Termómetros empleados y modo de manejarlos	26
Trazado de curvas de temperatura	27
Medición de temperaturas por variación de resistencias	31
CAPÍTULO III. — <i>Medida de la potencia útil de un motor</i>	
Procedimiento directo	33
Medición de velocidad.....	34
Medición del par resistente.....	44
CAPÍTULO IV. — <i>Pruebas en máquinas de corriente continua.</i>	
Características	52
Característica en vacío.....	52
Característica interna de un motor	61

Característica de velocidad para un motor sin carga	62
Características de tensión y velocidad.....	63
Característica externa	65
Dínamo de excitación separada	66
Dínamo de excitación shunt	69
Dínamo excitada en serie.....	72
Dínamo de excitación compuesta.....	73
Rendimiento.....	73
Medida directa del rendimiento de un motor.	75
Medida del rendimiento de un motor por el método de pérdidas separadas	76
Medida directa del rendimiento de una dínamo	80
Método de recuperación	82
Medida del rendimiento de una dínamo por el método de pérdidas separadas	85
Separación de pérdidas	86
Pruebas en motores serie	91
Rigidez dieléctrica.....	92
Observación general.....	93

CAPÍTULO V. — *Pruebas de transformadores.*

Comprobación de espiras	94
Relación de tensiones	96
Relación de corrientes.....	97
Resistencias	99
Rigidez dieléctrica.....	99
Pérdidas en vacío	101
Pérdidas en corto circuito	103
Montaje reducido	105
Rendimientos. Método directo.....	107
Método de pérdida separada	108

Caída de tensión.....	111
Elevación de temperatura	113

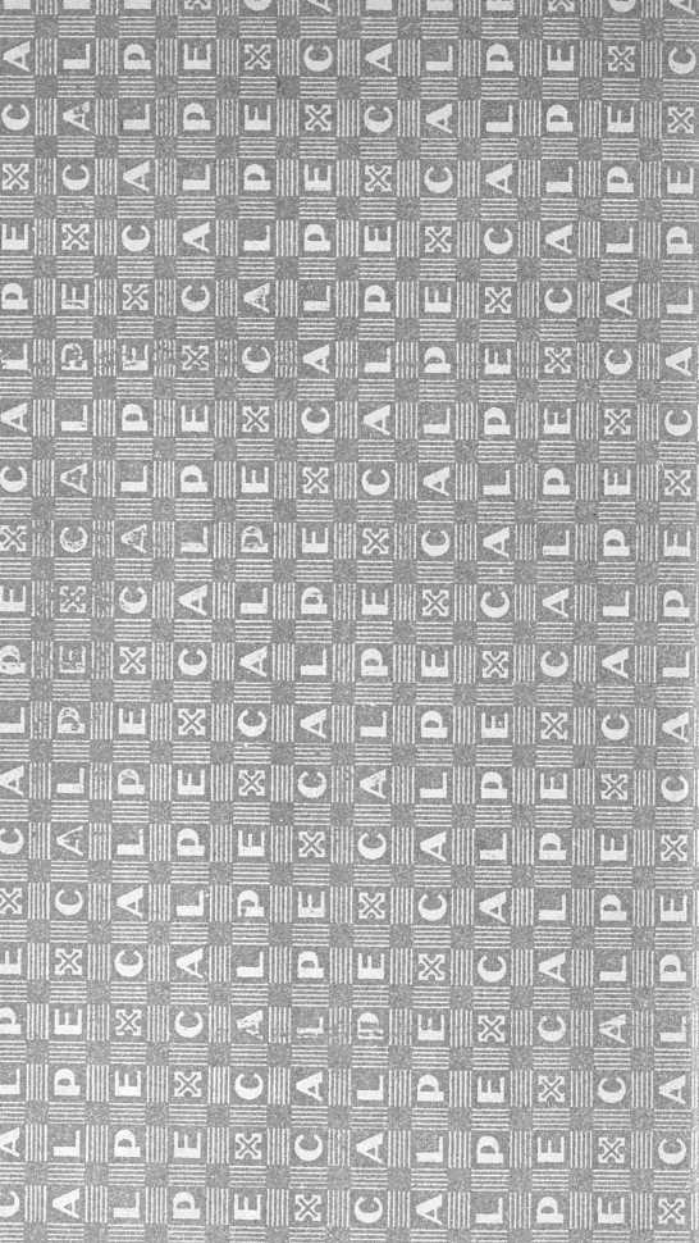
CAPÍTULO VI. — *Prueba de alternadores.*

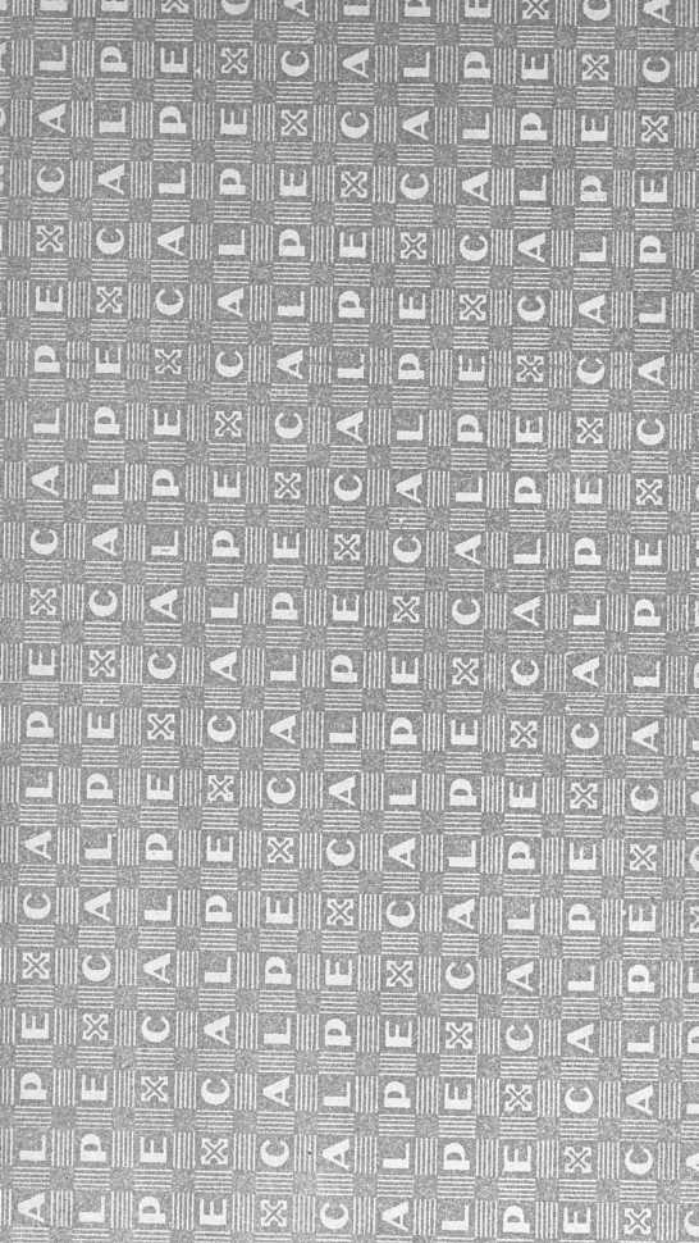
Características más notables del alternador.....	114
Característica en circuito abierto	114
Característica de corto circuito.....	117
Característica de excitaciones	118
Método de composición de corrientes	119
Método de composición de tensiones	121
Característica de pérdidas magnéticas	124
Característica de pérdidas en el cobre inducido	124
Característica de rendimientos	125
Medida directa del rendimiento de un alternador.....	127
Rigidez dieléctrica.....	128

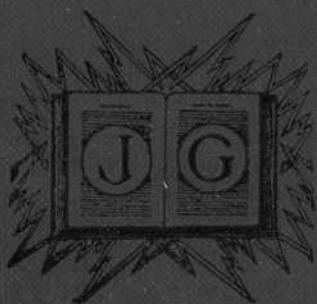
CAPÍTULO VII. — *Prueba de motores asíncronos*

Campos giratorios y velocidades.....	129
Deslizamiento	131
Potencia total y partes en que se descompone	134
Medida de la potencia en vacío	135
Observación	138
Medida de la potencia de corto circuito....	139
Corriente de corto circuito a plena tensión.....	141
Potencia de corto circuito para distintas corrientes	141
Determinación del rendimiento por el método de pérdidas separadas	142
Método del deslizamiento	146
Método directo	147
Rigidez dieléctrica.....	149









D
10

D-2

1045

STONWALL JACOBS DR. WAT. BR.