1905

Ante-proyecto de una dinamo tetrapolar Gramme de 220 Kilowatts de potencia, dando 500 volts sin carga y 550 á plena carga en los terminales, con una velocidad periférica de 18 metros por segundo correspondiente á 425 vueltas por minuto. La longitud de hilo eficaz será 0,50 metros. La máquina ha de tener el inducido de tambor, en serie y la excitacion será compound de corta derivacion.

Inducido

Radio del tambor

Puesto que en la circunferencia la velocidad es 18 metros por segundo, y el número de vueltas correspondiente es $\frac{425}{60}$, tendremos:

$$\frac{2\pi r . 425}{60} = 1800 \text{ cm.}$$

$$r = 42,5 \text{ cm.}$$

Longitud de inducido correspondiente á cada polo.

Suponiendo que los inductores cubren el 70 % de la circunferencia exterior de la armadura esta longitud valdrá:

$$\frac{1}{4} 2\pi . 42,5 . 0,70 = 46,5$$

Número de hilos del inducido

Este número está relacionado con el paso por la fórmula:

$$n = 2py \pm 2$$

siendo y el paso y $2p$ el número de polos. Adoptaremos el nº 31 para paso y por lo tanto $n = 126$ y para que la máquina dé fuerza electromotriz suficiente emplearemos dos capas de hilo; el número total de estos será pues $n = 252$.

El colector constará de 126 láminas y como el inducido es en serie la tensión de 550 volts se repartirá entre 63 láminas dando una diferencia de potencial entre dos consecutivas de

$$\frac{550}{63} = 8{,}7 \text{ volts}$$

que es una cifra aceptable.

Pérdida por efecto Joule en el inducido

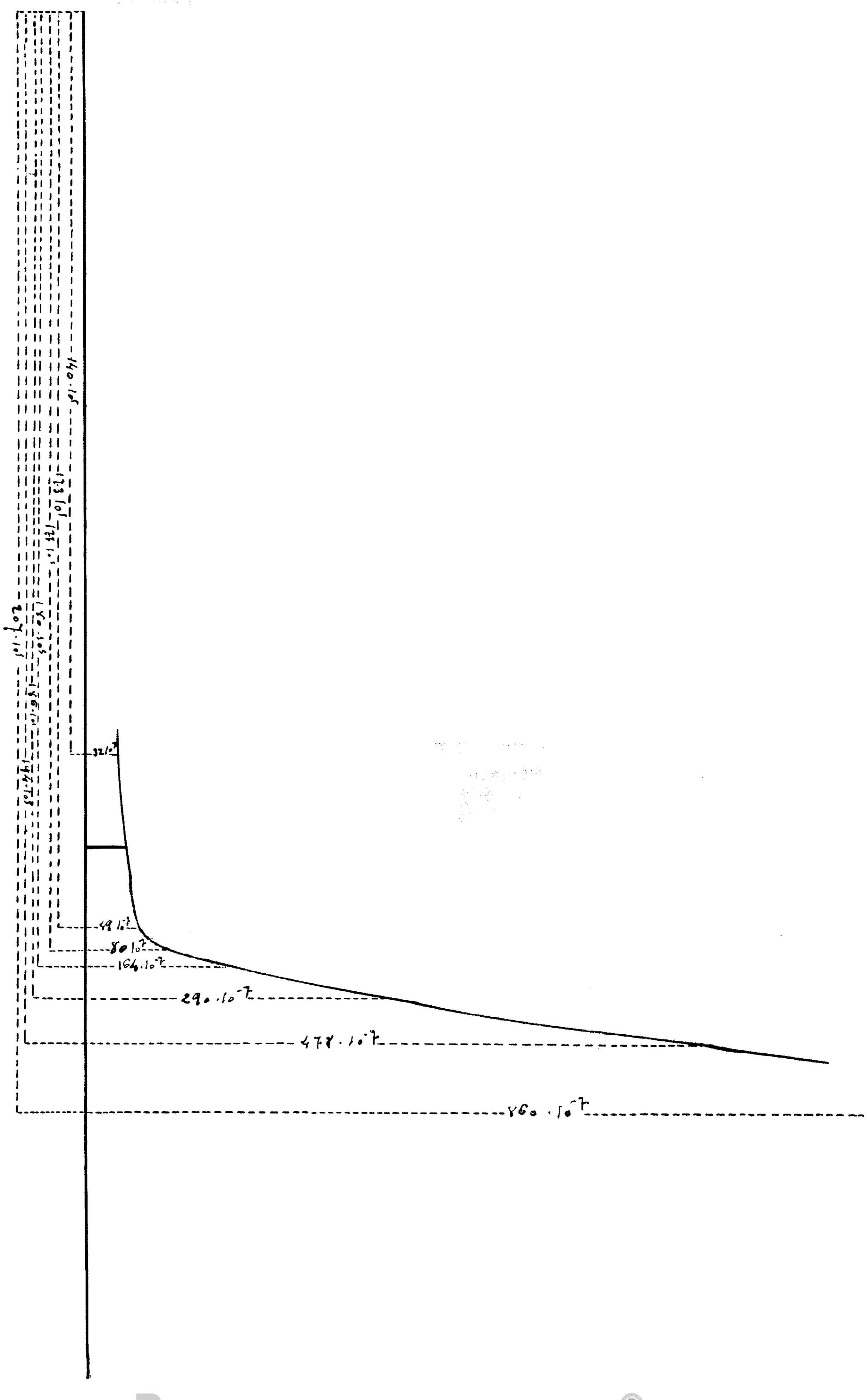
Admitiremos una pérdida de 1,5 % de la potencia total, ó sea

$$220 \cdot 0{,}015 = 3{,}3 \text{ Kilowats}.$$

Corriente útil

$$i_u = \frac{220.000^{W}}{550 \text{ V.}} = 400 \text{ Amperes}$$

Suponiendo la corriente de excitación 0,5% de la útil ó sea de 2 amperes la corriente total será de 402 Amperes.



32.10^-7
49.10^-7
80.10^-7
164.10^-7
290.10^-7
478.10^-7
860.10^-7

Resistencia del inducido

Se hallará dividiendo la pérdida por efecto Joule por el cuadrado de la corriente; valdrá:

$$\frac{3.300 \text{ vatios}}{(402 \text{ Amperes})^2} = 0{,}021 \text{ Ohms.}$$

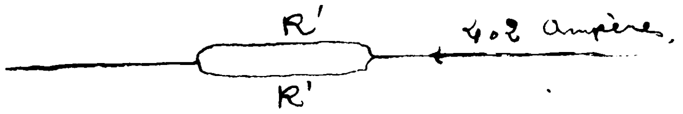
Pérdida de voltage producida por la resistencia de la armadura

$$402.a \times 0{,}021.O. = 8{,}4 \text{ Volts}$$

El inducido tendrá por lo tanto que producir una tensión de 558,4 Volts.

Seccion del hilo del inducido.

Siendo $R' = \rho \frac{\frac{l}{2}}{s}$ la resistencia de cada mitad del inducido, la resistencia total será:



$$R = \frac{1}{\frac{1}{R'}+\frac{1}{R'}} = \frac{R'}{2} = \rho \cdot \frac{l}{4s}$$

de donde:

$$s = \frac{\rho \cdot l}{4R.}$$

Para hallar l habrá que contar no solo los 50 cm de longitud eficaz sino las partes que sobresalen del inducido que supondremos de 4 cm por cada lado y las conexiones que podemos suponer equivalentes á la cuarta parte de la circunferencia. La longitud será, pués:

$$252\,[50+8+\frac{\pi}{2}.42{,}5]\,cm = 312 \text{ metros}$$

y sustituyendo este valor y los:

$$R = 0{,}021 \quad y \quad \rho = 1{,}6.10^{-6}$$

tendremos:

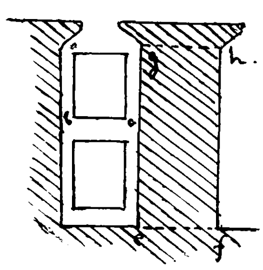
$$s = 1{,}6.10^{-6}\,\frac{312.10^{2}}{4.\,0{,}021} = 0{,}595 \text{ cm}^{2}.$$

Densidad de corriente por milimetro cuadrado:

$$\frac{\frac{1}{2}\,402 \text{ Ampères}}{59{,}5} = 3{,}3 \text{ Ampères}.$$

Dimensiones de dientes y ranuras

Siendo la seccion de las barras



59,5 mm² podemos dar á estas barras las dimensiones:

$ab = 10{,}8$ mm.

$bc = 5{,}5$ mm.

Suponiendo que aumenta el espesor en 1 mm por el aislamiento de los cables daremos á las ranuras las dimensiones:

Profundidad 27,5 mm ; Anchura 9 mm para tener tambien en cuenta el juego que ha de haber entre las barras y las ranuras.

Para las dimensiones de los dientes tendremos:

$$ef = \frac{\pi(85 - 2.2{,}75)}{126} - 0{,}9 = 1{,}08 \text{ cm}$$

puesto que ef + ancho de la ranura $= \frac{1}{126}$ de la longitud de la circunferencia.

Análogamente tendremos:

$$g h = \frac{\pi . 85}{126} - 0,9 = 1,22 \text{ cm}.$$

<u>Flujo</u>

Se hallará por la igualdad:

$$E = \Phi . N . n . 10^{-8} \text{ volts}$$

en la que E es la fuerza electromotriz inducida, Φ el flujo total, ó sea el que parte de los dos polos N, n el número de hilos y N el de vueltas en 1".

Suponiendo que la caída de voltage en el inductor en serie es la cuarta parte de la del inducido, la fuerza electromotriz total habrá de ser

$$E = 558,4 + \tfrac{1}{4} 8,4 = 560,5 \text{ volts}.$$

El valor del flujo será:

$$\Phi = \frac{560,5 \times 10^8}{\frac{425}{60} . 252} = 314 . 10^5 \; [c\,g\,s].$$

y el que corresponde á cada circuito magnético será

$$\tfrac{1}{4}\, 314 . 10^5 = 78,5 . 10^5 \; [c\,g\,s].$$

El flujo sin carga se sabrá hallando el cociente:

$$\Phi'_0 = \frac{550 . 60 . 10^8}{425 . 252} \; [c\,g\,s].$$

Suponiendo que la inducción en la

armadura sea 12000 [CGS] la seccion estará determinada por:

$$s = \frac{\text{flujo}}{\text{induccion}} = \frac{78,5 \cdot 10^5}{12000} = 653 \text{ cm}^2.$$

Siendo 50 cm la longitud del nucleo, si se practican 5 coronas de ventilacion de 8 mm cada una, la longitud de hierro será, contando 7 cm para el aislador de esas coronas:

$$50 - 11 = 39 \text{ cm}.$$

y por lo tanto el espesor radial será:

$$\frac{653}{39} = 16,8 \text{ cm}.$$

y el radio de la parte hueca del tambor

$$42,5 - 2,75 - 16,8 = 22,90 \text{ cm}.$$

<u>Volumen de hierro del inducido</u>

Será:

$$V = 39 \left\{ \pi \left[(42,5 - 2,75)^2 - \overline{22,9}^2 \right] + \frac{1,08 + 1,22}{2} \cdot 2,75 \cdot 126 \right\}$$

suponiendo trapezoidal la seccion de los dientes, es decir: prescindiendo de las expansiones de estos.

Resulta para V el valor

$$144.729 \text{ cm}^3.$$

Entre-hierro

Se obtendrá por la fórmula empírica de M. Esson

$$ni = 192 . \frac{H . l_e}{\beta}$$

siendo ni los amperes-vueltas de la armadura, H la intensidad media del campo en el entre-hierro, l_e el doble de la longitud de este y β el ángulo en el centro correspondiente á una pieza polar; tendremos:

$$l_e = \frac{232 . 201^{(a)} . 63^\circ}{192\ H.}$$

La superficie de una pieza polar será $50 \times 46{,}5 = 2325$ cm² y como el ancho de una ranura y un diente es 1,98 cm, frente á cada polo habrá $\frac{46{,}5}{1{,}98} = 23{,}5$ dientes; y aumentando este número en $1/10$ para tener en cuenta la dispersion del flujo, tendremos para valor de la superficie total de penetracion:

$$1{,}7 . 50 . 25{,}85 = 2190 \text{ cm}^2$$

puesto que el ancho de cada diente es de 1,22 más las expansiones que podemos suponer de 25 mm á cada lado, ó sea proximamente 1,7 cm.

Para valor de la superficie del entre-hierro tendremos:

$$2s_e = \frac{1}{2}(2325 + 2190) = 2257 \text{ cm}^2$$

y para la intensidad del campo magnético en el entre-hierro á plena car-

-ga hallamos:

$$\mathcal{H} = \frac{\frac{1}{2}\Phi}{2 S_e} = \frac{\frac{1}{2}\, 314 \cdot 10^5}{2257} = 6960 \ [cgs]$$

Sustituyendo este valor encontrado para $\mathcal{H}$:

$$l_e = \frac{252 \cdot 201 \cdot 63}{192 \cdot 6960} = 2,4.$$

y el entrehierro valdría 1,2.

Este valor sería admisible si el inducido fuera liso, pero como es dentado habrá que restarle el espesor de una capa de aire que tuviera la misma resistencia magnética que la parte de dientes y ranuras comprendidos en uno de los circuitos; vamos, á hallar ese espesor de aire.

La seccion de hierro de un diente será:

$$\frac{1,08 + 1,22}{2} \cdot 39 = 44,7 \ cm^2.$$

y siendo $\mu = 526$ para una induccion de 12000 unidades tendremos para la resisten-cia magnetica de un diente:

$$R_d = \frac{L}{\mu . S} = \frac{2,75}{526 \cdot 44,7} = 0,0001175 \ [cgs]$$

La resistencia de una ranura será pues-to que $\mu = 1$:

$$R_r = \frac{L}{S} = \frac{2,75}{0,9 \cdot 50} = 0,061 \ [cgs].$$

La resistencia magnética combinada de los 25,85 dientes y ranuras (contando $\frac{1}{10}$ por la dispersion del flujo) que hay frente á cada polo será:

$$R_c = \frac{1}{25,85} \cdot \frac{1}{\frac{1}{0,0001175} + \frac{1}{0,061}} = 0,0000049 \ [cgs].$$

El flujo que pasa por un diente será, suponiendo una inducción de 15000 [c g s]:

$$\Phi_d = B s_d = 15000 . 44,7 = 670500 \ [c g s]$$

y puesto que los flujos están en razón inversa de las resistencias magnéticas el flujo que atraviesa una ranura valdrá:

$$\Phi_r = \frac{670.500 \times 0,0001175}{0,061} = 1210 \ [c g s]$$

y el flujo compuesto será, para los 25,85 dientes:

$$\Phi_c = (\Phi_d + \Phi_r) 25,85 = 173 . 10^5 \ (\text{Webers})$$

Repitiendo cálculos análogos para valores 14000, 16000, 17000, 18000, 19.000 y 20.000 [c g s] de la inducción hallaremos otros tantos valores para R_c y Φ_c con los cuales podemos construir una curva. Llevando luego sobre el eje Φ_c la magnitud $157 . 10^5$, podremos trazar la ordenada correspondiente de la curva y, medida, conoceremos R_c para ese valor del flujo.

De este modo hallamos $R_c = 0,0000040$.

y como el flujo atraviesa en serie dos mitades de entre-hierro, la resistencia será

$$0,0000040 \times 4 = 0,000016 = \frac{l_e}{s}$$

siendo l_e la longitud del circuito magnético y s la mitad de la superficie del entre-hierro

Tendremos:

$$l_e = 0,000016 . \tfrac{1}{2} \, 2257 = 0,02.$$

El espesor de entre-hierro hallado por la fórmula de M. Esson era 2,4, luego el espesor haciendo la correccion será

$$2{,}4 - 0{,}02 = 2{,}38$$

y el juego entre el inducido y los inductores será 1,19 cm.

- Inductores -

Para hacer el cálculo vamos á considerar solamente uno de los cuatro circuitos magnéticos que hay en una dinamo de esta clase.

Admitiremos para induccion en los núcleos 15000 [CGS] y para coeficiente de dispersion del flujo $\nu = 1{,}2$.

La seccion transversal de los inductores se hallará por la fórmula:

$$B_i \cdot 2 s_i = \nu \frac{\Phi}{2}$$

de donde:

$$2 s_i = \frac{\nu \Phi}{2 B_i} = \frac{1{,}2 \cdot 314 \cdot 10^5}{2 \cdot 15000} = 1245 \text{ cm}^2$$

á la cual corresponde un radio de 19,8 cm.

La seccion de la culata será, suponiendo que la induccion en ella sea de 14000 [CGS]:

$$s_c = \frac{\frac{1}{4} \nu \Phi}{B_c} = \frac{1{,}2 \cdot 314 \cdot 10^5}{4 \cdot 14000} = 672 \text{ cm}^2.$$

Como la longitud es 50 cm, la otra dimension será $\frac{672}{50} = 13{,}4$ cm.

Admitiremos para espesor ó altura de los inductores 30 cm.

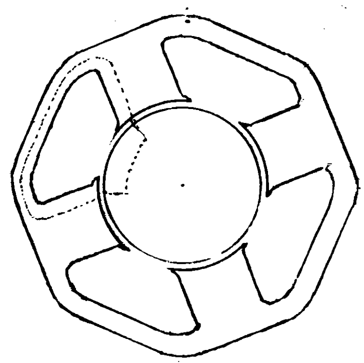
Los ampères-vueltas necesarios en las dos bobinas que componen un circuito magnético, para obtener una tension de 550 volts á plena carga se deducen de la fórmula de Hopkinson:

$$4\pi\left(mi - \frac{\alpha}{180}\, n\, \frac{i_a}{2}\right)10^{-1} = \Phi_c\left(R_a + R_e + R_d\right) +$$

$$+ \nu\,\Phi_c\left(R_p + R_i + R_c\right)$$

en la cual los subíndices expresan: armadura, entrehierro, dientes, piezas polares, núcleo de los inductores y culata.

Para calcular las distintas resistencias aplicaremos la fórmula $R = \frac{l}{\mu s}$ en la cual l representa las longitudes medias de las líneas de fuerza, las cuales pueden medirse en la figura.



Estas longitudes son:

$l_a = 35$ centímetros

$l_e = 2,3$ "

$l_p = 4$ "

$l_i = 76$ "

$l_c = 105$ "

Las secciones son:

$s_a = 653$ centímetros cuadrados

$s_e = 1128$ "

$s_p = \frac{1}{2}\,\frac{2325 + 1245}{2} = 892$

$s_i = \frac{1}{2}\,1245 = 622$

$s_c = 672$

Los valores de la inducion:

$$B_p = \frac{1}{4}\frac{v\Phi}{S_p} = 10470 \ [cgs]$$

$$B_a = 12.000 \quad "$$

$$B_i = 15.000 \quad "$$

$$B_c = 14000 \quad "$$

y los coeficientes de permeabilidad para estas inducciones:

$$\mu_a = 1.412$$

$$\mu_i = 526$$

$$\mu_p = 1745$$

$$\mu_c = 823.$$

Con estos valores obtenemos

$$R_a = 0,0000382$$

$$R_e = 0,0021$$

$$R_i = 0,000237$$

$$R_p = 0,000002551$$

$$R_c = 0,000189$$

y la ya hallada:

$$R_d = 0,000026.$$

Sustituyendo estos valores y los

$$a = 12^\circ$$

$$S_a = 402$$

$$n = 252$$

en la ecuacion de Hopkinson queda:

$$mi = \frac{12}{180} 252 . 201 + \frac{10}{4\pi}\left[0,00216 . \frac{314}{4} . 10^5 + 1,2 . 0,00042 \frac{314}{4} . 10^5\right] =$$

$$= 3400 + 16.600 = 20.000 \text{ amperes metros.}$$

Vamos á aplicar esta misma marcha en la hipotesis en que la dinamo funcione sin carga. En este caso la ecuacion de Hopkinson se reduce á

$$4\pi m i_d . 10^{-1} = \frac{\Phi_0}{4}(R'_a + R'_d + R'_e) + v\frac{\Phi_0}{4}(R'_p + R'_i + R'_c)$$

puesto que en este caso puede despreciarse el término sustractivo por ser pequeña la reacción de armaduras.

Calculando las resistencias del mismo modo que antes se halla:

$$R'_a = \frac{35}{1780 \cdot 653} = 0,0000302$$

$$R'_p = \frac{4}{2097 \cdot 892} = 0,0000214$$

$$R'_i = \frac{76}{786 \cdot 622} = 0,000122$$

$$R'_c = \frac{105}{1255 \cdot 672} = 0,000121.$$

$$R'_e = R_e = 0,0021$$

$$R'_d = R_d = 0,000026.$$

y sustituyendo y haciendo operaciones resulta:

$$m\, i_d = 15.000 \text{ amperes-vueltas.}$$

ó sea 7500 por bobina para la excitación en derivación puesto que el cálculo está hecho funcionando la dinamo sin carga.

Cuando marcha con carga la corriente aumentará en la relación $\frac{550}{500}$ y por lo tanto este número 7500 se convertirá en $7500 \frac{550}{500}$.

Los ampères-vueltas correspondientes á la excitación en serie serán

$$10.000 - 7500 \frac{550}{500} = 1.750$$

y puesto que la corriente es de 402 ampères necesitaremos $\frac{1750}{402}$ vueltas número que elevaremos á 6 y si admitimos una densidad de corriente de 1,6 ampère por milímetro cuadrado, la sección será $s = \frac{402}{1.6} = 250 \text{ mm}^2$, sección que se obtiene uniendo en paralelo dos bandas de cobre de 0,312 x 4 cm.

El espesor de arrollamiento lo supondremos de 7 cm.

Pérdida de voltage producida por los electros en serie

La longitud de una espira será, contando 0,75 para el aislamiento de gutta;

$$2\pi\left(\frac{7}{2}+r+0,75\right)=2\pi.24,05=151,5$$

y todas las espiras en serie darán una longitud 151,5 . 6 = 909 centímetros

La resistencia será:

$$R = 4.\rho\frac{l}{s} = 4.2.10^{-6}\frac{909}{2,5} = 0,0030 \text{ ohms}$$

puesto que las cuatro bobinas están en serie.

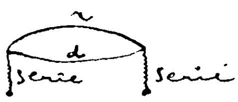
La pérdida de voltage será:

$$0,0030^{\text{Ohms}} . 400^{\text{amperes}} = 1,2 \text{ volts}.$$

y la de potencia.

$$1,2 . 400 = 480 \text{ Watts}$$

Cálculo de los inductores en derivación



Tenemos:

$$m\,i_d = 7.500$$

$$R_d = \rho\frac{l_m}{s}\, m = \frac{E}{i_d}$$

de donde

$$s = \frac{\rho . l_m . 7500}{E}$$

ó sea:

$$s = \frac{2.10^{-6} . 151,5 . 7500 . 4}{500} = 0,0186 \text{ cm}^2.$$

correspondiente á un radio

$$r_d = 0,074 \text{ cm}$$

El diametro contando la cubierta aisladora será 0,2 cm y el numero de capas de hilo $\frac{7}{0,2} = 35$. Descontando el sitio que ocupan las espiras en serie cada capa estará formada por $\frac{25}{0,2} = 125$ espiras, y el numero total de estas para el circuito en derivacion de la excitacion será

$$4 \cdot 35 \cdot 125 = 17.500$$

La resistencia valorá:

$$R_d = 2 \cdot 10^{-6} \frac{17500 \cdot 151,5}{\pi \cdot 0,074^2} = 314 \text{ ohms.}$$

siendo la corriente

$$i = \frac{550 \text{ volts}}{314 \text{ ohms}} = 1,75 \text{ ampère}$$

la cual corresponderá á una densidad:

$$\frac{1,75}{\pi \cdot 0,74^2} = 1,02 \text{ ampère por milimetro cuadrado.}$$

La pérdida por efecto Joule será

$$550 \cdot 1,75 = 765 \text{ Watts.}$$

Pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault

La primera se hallará aplicando la fórmula de Steinmetz: $0{,}00262 \cdot B^{1,6}$ ergs por unidad de volumen y por ciclo.

Para el núcleo esta pérdida es:

$$0{,}00262 \cdot 12000^{1,6} \cdot 122729 \cdot \frac{425}{60} \cdot 10^{-7} = 1280 \text{ wats}$$

y para los dientes:

$$0{,}00262 \cdot 15000^{1,6} \cdot 22000 \cdot \frac{425}{60} \cdot 10^{-7} = 270$$

ó sea en total 1550 Wats.

La pérdida producida por las corrientes de Foucault suelen ser 2½ veces las de histéresis ó sea 3875 Wats.

Rendimiento

Las pérdidas á plena carga son:

Efecto Joule en el inducido	3.300	W.
" " " la excitación en serie	480	"
" " " " " en derivación	965	"
Histéresis en el núcleo	280	"
" " los dientes	270	"
Corrientes de Foucault	3.875	"
Rozamientos (3 % de la potencia útil)	6.600	"
Total	16.770	

El rendimiento industrial probable será, pues:

$$\frac{220.000}{220.000 + 16770} = 0{,}92 \text{ próximamente}$$

Devanado — escobillas

Como hemos dicho se han empleado

dos capas de hilo, ó sea en total 252.
Con el dibujo se indican con las dos tintas, estos dos sistemas de barras, empleando para las uniones el mismo color que tienen las barras que han de unirse.

Las escobillas resultan á 90°; Podría haberse puesto la positiva en el encuentro de los hilos 64 y 95, en lugar de haber perdido ese hilo 64. De este modo se evitaría también que las láminas del colector estén á diferencias de potencial desiguales como forzosamente sucedería en el caso indicado en el dibujo porque entre las dos escobillas sólo habría la cuarta parte de láminas del colector.

Debe preferirse, por lo tanto, unir la escobilla positiva á 180° de la negativa, aunque quede á distinto lado del colector, porque en el caso actual como el inducido es hueco puede llevarse por su interior un hilo desde el encuentro de los 64 y 95 hasta el lado del colector y ya tenemos las escobillas del mismo lado, sin los inconvenientes dichos.

Madrid, Junio 1905

José Tapia