

ESCUELA DE INGENIERIA

TECNICA INDUSTRIAL DE

SAN SEBASTIÁN

CARPETA DE CALCULO DE LA MÁQUINA SINCRONA

0.0. RESUMEN

El informe que a continuación se presenta es el estudio y cálculo de un generador sincrónico. Para realizar dicho cálculo hemos partido de unos datos iniciales, y se ha ido calculando, poco a poco, todos los parámetros de la máquina. Para así poder realizar un estudio sobre su funcionamiento.

En primer lugar, se han hecho unos precalculos, en el inicio de la carpeta; en donde se han calculado algunos valores más representativos. Los siguientes capítulos estarán dedicados al estudio del circuito eléctrico de los devanados; tanto del estator, como del rotor. A continuación dedicamos un capítulo para el estudio de la curva de vacío, de nuestra máquina (es decir estudio en sí, de los parámetros magnéticos). Luego se realiza un estudio de la máquina cargada; y a continuación se realiza el estudio en cortocircuito, para así obtener la recta en cortocircuito; que junto con la curva de vacío nos dará información para calcular la impedancia sincrónica.

Por último realizaremos un estudio, de pérdidas de la máquina y el rendimiento total que se produce. También obtendremos algunos parámetros térmicos, como es la temperatura de trabajo, que se produce en diversas partes de la máquina.

1. INTRODUCCIÓN

La máquina sincrónica es un tipo de máquina eléctrica de corriente alterna; es decir nos encontramos ante un generador de tensión y corriente de evolución senoidal en el tiempo.

Su principal característica, es que gira a velocidad constante. Por lo tanto, se puede suponer que siempre la frecuencia se mantiene constante (en Europa 50 Hz. y en América 60 Hz); ya que la velocidad angular y la frecuencia son proporcionales. Otra característica es que son máquinas muy grandes, de gran potencia, pudiendo estar situadas en centrales de generación eléctrica (centrales hidráulicas, térmicas).

En este informe se presenta el proceso de cálculo de una máquina de este tipo. Se recuerda que no es un informe exhaustivo, ya que no estamos tratando una ciencia exacta, sino una aproximación a un determinado trabajo.

2.DATOS DE LA MÁQUINA

A continuación podemos ver los datos de los cuales se ha partido para hacer el estudio de la máquina:

2.1.Características generales de la máquina

1.1 Nomenclatura de la máquina

1.2 Potencia de la máquina 6356 Kw.

1.3 Tensión nominal 6300 V.

- 1.4 Factor de potencia 0.700
- 1.5 Tipo de factor de potencia Inductivo
- 1.6 Velocidad 750 rpm.
- 1.7 Frecuencia de la red 50 Hz.
- 1.8 Tipo de conexión Estrella
- 1.9 Escobillas No
- 1.10 Tipo de equipo de regulación Compuesto
- 1.11 Temperatura ambiente 45° C.
- 1.12 Forma de funcionamiento Generador

2.2.Características generales de la chapa

- 2.1 Diámetro exterior del estator 1875 mm.
- 2.2 Diámetro interior del estator 1450 mm.
- 2.3 Entrehierro radial 6 mm.
- 2.4 Diámetro interior del rotor 1075 mm.
- 2.5 Longitud del hierro 1050 mm.
- 2.6 Número de ranuras del estator 144
- 2.7 Número de divisiones del rotor 120
- 2.8 Inclinação de los canales del rotor 1
- 2.9 Número de canales radiales de ventilación 16
- Anchura de los canales radiales 12 mm.
- 2.10 Factor de apilamiento de la chapa 0.950
- 2.11 Tipo de chapa magnética del estator 1.70 w/kg.
- 2.12 Tipo de chapa magnética del rotor Chapa negra
- 2.13 Las características de los canales axiales son:

No existen canales axiales ni en el estator, ni en el rotor.

2.3.Ranura de estator tipo abierta

3.1 Anchura superior de la ranura 15.00 mm.

3.2 Altura total de la ranura 85.00 mm.

3.3 Anchura superior de la cuña 19.00 mm.

3.4 Altura de la cuña 05.00 mm.

3.5 Altura de la garganta 01.50 mm.

3.6 Cuña magnética NO

2.4. Ranura de excitación del rotor tipo semicerrada

4.1 Anchura de la garganta 08.00 mm.

4.2 Altura de la garganta 02.50 mm.

4.3 Altura de la zona de estrangulamiento 05.00 mm.

4.4 Anchura de la ranura 18.00 mm.

4.5 Altura total de la ranura 110.00 mm.

2.5. Ranura de amortiguación del rotor tipo redonda

5.1 Anchura de la garganta 2.00 mm.

5.2 Altura de la garganta 3.00 mm.

5.3 Diámetro de la ranura 10.50 mm.

2.6. Devanado del estator

6.1 La bobina esta constituida de pletina

6.2 Geometría de la pletina (1) 2.80 x 8.00 mm²

Número de paralelos para conductor 1 2

6.3 Numero de capas del bobinado 02

6.4 Número de conductores por ranura 10

6.5 Número de conexiones en paralelo 04

6.6 Paso de la bobina en ranuras 15

6.7 Saliente recto de la cabeza de bobina 80.00 mm.

6.8 Distancia entre bobinas sucesivas 06.00 mm.

2.7.Devanado de excitación del rotor

7.1 La bobina está constituida de pletina

7.2 Geometría de la pletina (1) 3.50 x 15.00 mm²

número de paralelos para el conductor (1) 1

7.3 Número de conductores por ranura 22.00

7.4 Número de conexiones en paralelo 2

7.5 Número de ranuras bobinadas por polo 10.00

7.6 Saliente recto de la cabeza de bobina 80.00 mm.

7.7 Distancia entre bobinas sucesivas 6.00 mm.

7.8 Altura total de la cuña 17.00 mm.

2.7. Características del devanado del rotor (cortocircuito)

8.1 El material de la barra es: Cu

Resistividad relativa 1.00

Coeficiente de temperatura 235.0 K

Peso específico 8.900 Kp / dm³

8.2 Geometría de la barra: diámetro 10.00 mm.

8.3 Saliente de la barra es 10.00 mm.

8.4 El material del aro es Cu

Resistividad relativa 1.00

Coeficiente de temperatura 235.0 K

Peso específico 8.900 Kp / dm³

8.5 La anchura del aro es 3.00 mm.

8.6 La altura del aro es 50.00 mm.

8.7 El diámetro medio del aro es 1450.00 mm.

2.9. Parámetros de calentamiento

9.1 Qdelta práctico de ensayo de estator 4700

3.PRECÁLCULOS

Para saber si la máquina, que vamos a estudiar es coherente con los datos que se han dado; se han de hacer unos precálculos. En este caso, sólo haremos el precálculo de la fuerza electromotriz. Para ello utilizaremos la siguiente ecuación:

(3.1)

Donde:

a) f: frecuencia (dato 1.7) = 50 Hz.

b) Kf: factor de forma:

c) p: número de pares de polos: la frecuencia y la velocidad vienen relacionadas por el número de pares de polos. Se tienen ambos datos, aunque la velocidad este en revoluciones por minuto y en la ecuación debe estar en revoluciones por segundo.

$$f = p \times n \quad 50 = p \times 750/60 \quad p = 4 \text{ pares de polos}$$

d) d : Factor de devanado, en este caso, del estator. El factor de devanado se compone de otros dos factores; el de distribución y el de paso.

$$d = \text{dis} \times \text{paso} \quad (3.2)$$

– Factor de distribución:

Donde: q, es el número de fases y u el número de ranuras por polo y fase.

– Factor de paso:

Se puede utilizar para calcular dicho valor, la tabla 1.04.15 a (pág. 164), del libro Cálculo Industrial de máquinas eléctricas Tomo I de Juan Corrales Martín. Para ello, se necesita por una parte el valor del número de ranuras por polo, y por otra parte el valor del paso de la bobina (dato 6.6) = 15.

$$\text{número de ranuras por polo} = \text{número de ranuras} / 2p = 144/8 = 18$$

Una vez calculado vamos a hallar el valor del paso relativo $Y_n / np = 15/18$; el cual utilizando la tabla anteriormente citada, dará un valor de factor de paso, de 0.966.

Se sustituye todos estos valores en la ecuación 3.2, obtendremos el factor de devanado:

$$d = \text{dis} \times \text{paso} = 0.956 \times 0.966 = 0.9235$$

e) Destator : diámetro interior del estator (dato 2.2) = 1450 mm

f) Lhierro : longitud del hierro (dato 2.5) más la mitad de la longitud correspondiente a los canales de ventilación = $1050 + 16 \times 12/2 = 1146$ mm.

g) Nestator : nº de espiras por rama y por fase. Para hallar el número de espiras habrá que ver cuántos

conductores hay:

$$N^{\circ} \text{ conduct} = N^{\circ} \text{ ranuras} \times N^{\circ} \text{ conduct por ranura} = 144 \times 10 = 1440$$

Como dos conductores forman una espira vemos ahora cuántas espiras se forman con los conductores que tenemos:

$$N^{\circ} \text{ espiras} = \text{espiras}$$

Como la máquina es trifásica dividiremos el número de espiras entre el número de fases, para ver cuántas espiras hay por fase:

$$N^{\circ} \text{ espiras por fase} = \text{espiras por fase}$$

Para terminar, dividiremos el número de espiras por fase entre el número de ramas en paralelo y obtendremos el número de espiras por fase y por rama:

$$N^{\circ} \text{ espiras por fase y rama} = \text{espiras}$$

h) Bmedia : inducción media en el entrehierro, que es igual a la inducción máxima entre /2, esto supondrá, un valor aproximado de $= 0.72 / (\sqrt{2}) \text{ T}$

Una vez hallados todos los valores necesarios, para calcular la fuerza electromotriz, se sustituirán simplificando los valores en la ecuación 3.1 y obtendremos:

$$E = 3679.31 \text{ V.}$$

Esta fuerza electromotriz hallada es por fase, para poder compararla con la tensión nominal se dividirá dicha tensión entre la raíz de 3.:

$$V_{\text{rama}} = 6300 / \sqrt{3} = 3637.31 \text{ v.}$$

Haciendo la diferencia entre las dos tensiones resulta un error del 1.15 % , es decir 42 voltios de diferencia.

4. ESTUDIO DEL DEVANADO DEL ESTATOR

4.1 Introducción.

En este apartado estudiaremos todos los datos relativos al devanado del estator, como son la longitud de cable que hace falta para bobinar todo el devanado, el peso de este cobre, la resistencia total que ofrece el cobre y la reactancia de todo el devanado. También se expresarán algunos datos en por unidad, puesto que en muchos casos interesa saber dicho valor.

4.2 Cálculo de la longitud del conductor medio.

– Sección de cobre

Se calcula directamente a través de la geometría de la pletina

$$S_{cu} = 2.8 \times 8 = 22.4 \text{ m}^2$$

– Longitud de la chapa de hierro

Será la suma de la longitud del hierro más la longitud de los canales de ventilación:

$$L = L_{FE} + (N_{canales} \times L_{canal}) = 1050 + (16 \times 12) = 1242 \text{ mm}$$

– Longitud de la cabeza de bobina

El paso de ranura (r) y el paso de bobina se calculan de la siguiente forma:

$$r = \frac{D_{me}}{Y_n} = 33.49 \text{ mm}$$

$$b = r \times Y_n = 33.49 \times 15 = 502.35 \text{ mm}$$

siendo D_{me} , el diámetro medio a las ranuras del estator. Se calcula geométricamente:

$$D_{me} = D_{inte \text{ estator}} + H_{ranura \text{ estator}} = 1450 + 85 = 1535 \text{ mm}$$

El ángulo de cabeza de bobina (α) se calcula también geométricamente:

$$\text{Ancho de bobina} = \text{Ancho de ranura} = 15 \text{ mm}$$

$$\text{Sen } \alpha =$$

$$\text{Sen } \alpha = 0.6270$$

$$\alpha = 38.83^\circ$$

Por lo tanto, la longitud de la cabeza de bobina es:

$$L_{cb} = \frac{b}{\text{Sen } \alpha} = 644.86 \text{ mm.}$$

– Saliente total de la cabeza de bobinado

$$S_{cb} = S + S_{recto} = 202.17 + 80 = 282.17 \text{ mm}$$

donde:

S: es el saliente de cabeza de bobina.

$$\text{tg } \alpha = \frac{S}{S_{recto}} \Rightarrow S = S_{recto} \times (\text{tg } \alpha) = 202.17 \text{ mm.}$$

Con todos estos datos ya podemos determinar la longitud de conductor medio, que será:

$$L_{cm} = L_{cb} + L + (2 \times S_{recto}) = 644.86 + 1242 + (2 \times 80) = 2046.86 \text{ mm}$$

4.3. Cálculo de otras longitudes.

En este apartado vamos a calcular algunas longitudes que pueden ser útiles para otros cálculos o como información adicional.

La longitud de una rama será la longitud de una espira, que estará formada por el doble de la longitud del conductor medio, por el número de espiras que tiene una rama.

long. de una rama = long. de una espira x nº de espiras por rama (4.3)

Devanado es trifásico

Esquema eléctrico del estator

En la figura se ha podido ver como cada circuito paralelo o rama de cada fase tiene 60 espiras, dato hallado en el apartado 3.g , entonces:

$$\text{Long. de una rama} = (2 \times 2.047) \times 60 = 245.64 \text{ m}$$

La longitud total de conductor que se empleará para bobinar el devanado será la longitud de una rama por el número de ramas en total que tiene la máquina:

$$\text{Long total de conductor} = \text{long. de una rama} \times \text{Nº de ramas} (4.4)$$

El número de ramas en total que tiene la máquina es el número de circuitos en paralelos o ramas por el número de fases:

$$\text{Nº ramas totales} = \text{nº de circuitos en paralelo} \times \text{nº de fases} = 4 \times 3 = 12$$

Sustituyendo en la ecuación 4.4 obtendremos que la longitud total de conductor a utilizar es:

$$\text{Long total de conductor} = 245.64 \times 12 = 2947.68 \text{ m}$$

Una vez hallado la cantidad de cable total se debe hallar la longitud de pletina, ya que el conductor que conforma las espiras está formado por la pletina.

* Pletina 1 : número de conductores que aporta (dato 6.2) = 2. La longitud de pletina total será: $\text{Long} = \text{nº de conductores} \times L_{\text{total}} = 2 \times 2947.68 = 5895.36\text{m}$.

4.4 Cálculo de la resistencia

Para el calculo de la resistencia se utilizará la siguiente ecuación:

$$R_{\text{rama}} = (4.5)$$

- a) es la conductividad del cobre, que a 20° C es 56 mm² / Ohm m
- b) Lrama Es la longitud de una rama, en este caso dicha longitud vale 245.64 m
- c) Sestator es la sección del conductor, que en nuestro caso estará formado por pletina

$$\text{Sestator} = 2 \times 2.8 \times 8 = 44.8 \text{ mm}^2$$

d) Ct es el coeficiente de temperatura necesario si se va a trabajar a temperaturas superiores a 20° C. Una máquina nunca va a trabajar por debajo de este valor. Para calcular este coeficiente utilizaremos el valor de la temperatura que soporta el aislamiento más común, el aislamiento clase F , que soporta un calentamiento de 100° C.

$$Ct =$$

$$C_t = 1.31$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 4.5 obtendremos el valor de la resistencia por rama:

$$R_{rama} = 0.129 \text{ Ohm}$$

Para saber, cuál es la resistencia por fase tendremos que dividir la resistencia por rama entre el número de ramas que tiene una fase:

$$R_{fase} = 0.03225 \text{ Ohm}$$

4.5. Cálculo de la reactancia por fase de dispersión.

Para el calculo de dicho parámetro se utilizará la siguiente ecuación:

$$X_{fase} = (4.6)$$

Donde:

- f: es la frecuencia de la red, 50 Hz (dato 1.7).
 - Nest : número de espiras por rama y fase, dato hallado en el apartado 3 g, 60 espiras.
 - p: pares de polos, dato hallado en el apartado 3 c , 4 pares de polos.
 - npf : número de ranuras por polo y fase, que se obtiene de dividir el número de ranuras entre el número de polos y el número de fases:
- $$npf = 6$$
- L: longitud total del estator, es decir, hierro más canales de ventilación radiales, dato hallado en el apartado 4.2, dando un valor de 1242 mm.
 - equiv : permeancia equivalente de la ranura. Dicha permeancia es la suma de tres permeancias parciales: de ranura, en zigzag y de la cabeza de bobina.

Para calcular dicha permeancia se dispone de la siguiente ecuación, que responde a lo enunciado anteriormente:

$$equiv. = \text{ranura} + \text{dientes} + \text{cabeza de bobina} \quad (4.7)$$

En primer lugar, se obtendrá el valor de la permeancia de ranura. La ranura del estator es de tipo abierto, pudiéndose dividir en tres zonas, como se indica la siguiente figura:

La permeancia total de la ranura será la suma de las tres zonas (al estar en paralelo), ya que cada zona es geométricamente distinta de las demás y cada zona concatenará distinto número de conductores. Por tanto, la permeancia total de la ranura quedará:

$$ranura = I + II + III \quad (4.8)$$

Para el cálculo de la zona I, se debe tener en cuenta que el devanado del estator dispone de dos capas (dato 6.3), por tanto, se tendrá que aplicar la siguiente ecuación:

$$I = K_c \times \text{cobre} + K_a \times \text{aire o aislante} \quad (4.9)$$

Los coeficientes K_c y K_a se obtienen de la gráfica 1.05.14c de la página 232 del libro Cálculo industrial de máquinas eléctricas Tomo I de Juan Corrales Martín. En dicha gráfica, aparecen dos curvas, una para cada coeficiente. En dicha gráfica se entra con el factor Y_n / n_p , donde Y_n es el paso de bobinas en ranuras (dato 6.6) y n_p es el número de ranuras por polo ($144 / 8 = 18$). Por tanto, dicho factor será de 0.833, que entrando en la gráfica se obtienen los siguientes valores para los coeficientes:

$$- K_c = 0.90$$

$$- K_a = 0.86$$

La permeancia de una ranura en la zona I, responde a la siguiente ecuación:

$$\text{cobre} = (4.10)$$

La altura, que aparece en la ecuación, es la altura de la zona I menos los espesores de aislamiento. Por tanto, la permeancia en dicha zona queda, como:

$$\text{cobre} = 1.389 Mx/Gb / \text{cm}$$

Suponiendo que el aislante ocupa una altura de 16 mm, al ser una máquina de alta tensión. Para calcular la permeancia de dicho aislante lo calcularemos con la misma ecuación que para el cobre. Por tanto, la permeancia de aislamiento será:

$$\text{aire o aislante} = 0.355 Mx/Gb / \text{cm}$$

Sustituyendo todos los valores obtenidos en la ecuación 4.9 se obtiene que la permeancia en la zona I será:

$$I = 0.9 \times 1.389 + 0.86 \times 0.355 = 1.5554 Mx/Gb / \text{cm}$$

Para el cálculo de las otras dos zonas (II y III) se utilizarán dos ecuaciones obtenidas del libro anteriormente citado, ya que en estas zonas la concatenación es íntegra. Por tanto, las permeancias vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

– Zona II:

$$II = 0.294 Mx/Gb / \text{cm}$$

– Zona III:

$$III = 0.10 Mx/Gb / \text{cm}$$

Si todos estos datos se sustituyen en la ecuación 4.8 se obtendrá la permeancia de la ranura, quedando, por tanto:

$$\text{ranura} = 1.5554 + 0.2940 + 0.100 = 1.9494 Mx/Gb / \text{cm}$$

La permeancia en la cabeza de bobina y la de dientes se calcularán mediante las siguientes ecuaciones, también obtenidas del libro de Juan Corrales Martín Cálculo industrial de máquinas eléctricas Tomo I:

$$- \text{dientes} = (4.13)$$

$$- \text{ cabeza de bobina} = 0.43 \times \text{npf} \times p^2 \times (4.14)$$

es el entrehierro radial (dato 2.3) y ag es la anchura de la garganta (dato 3.1). En la segunda ecuación, npf es el número de ranuras por polo y fase (hallado en el apartado 3 g), p es el factor de acortamiento de paso (hallado en el apartado 3 d), Lcb será la longitud de la cabeza de bobina (hallado en el apartado 4.2) y L es la longitud total del estator, es decir, incluyendo los canales de ventilación radiales (datos 2.9 y 2.5). Si sustituimos todo quedarán las siguientes permeancias:

$$- \text{ dientes} = 0.303 \text{ Mx/Gb} / \text{cm}$$

$$- \text{ cabeza de bobina} = 0.43 \times 6 \times 0.9662 \times = 1.25002 \text{ Mx/Gb} / \text{cm}$$

Una vez obtenidas todas las permeancias parciales se sustituye en la ecuación 4.7, para obtener la permeancia total:

$$\text{ranura} = 1.9494 + 0.303 + 1.25002 = 3.50242 \text{ Mx/Gb} / \text{cm}$$

Una vez que se conocen todos los datos que aparecen en la ecuación 4.6 se sustituyen y se obtiene la reactancia de dispersión por fase:

$$\text{Xfase} = 0.5152 \text{ Ohm} / \text{fase}$$

4.6. Resistencia por fase en por unidad.

Como ya se ha dicho en la introducción, en algunos casos es recomendable dar los resultados en por unidad. Para ello hay que hallar la impedancia de base que vendrá dada por la siguiente relación:

$$\text{Zb} = (4.15)$$

El valor de la tensión de base es la tensión que genera la máquina y que es raíz de tres veces menor que la tensión nominal (dato 1.3) 6300 v. La intensidad, en cambio, hay que obtenerla de la ecuación que relaciona la potencia con la tensión y la intensidad:

$$\text{Ib} = (4.16)$$

El valor de la potencia aparente se obtiene de la potencia activa (dato 1.2) y el factor de potencia (dato 1.4) de la máquina:

$$\text{S} = 9080 \text{ KVA}$$

Sustituyendo en la ecuación 4.16 se obtiene la intensidad de base:

$$\text{Ib} = \text{A.}$$

De igual manera, si se sustituye en la ecuación 4.15, se obtiene la impedancia de base:

$$\text{Zb} = \text{Ohm}$$

Si se divide la resistencia por fase obtenida en el apartado 4.4 se obtendrá la resistencia por fase en por unidad:

$$\text{Rpu} = \text{pu}$$

4.7. Reactancia por fase en por unidad.

Este parámetro, al igual que al anterior, también se suele expresar en por unidad, por tanto, se dividirá la reactancia entre la impedancia base hallada en el apartado 4.6.

$$X_{pu} = \frac{X}{Z_{base}}$$

4.8 Cálculo del peso.

Como dato de interés se puede hallar el peso total de cobre utilizado, multiplicando el volumen por el peso específico del cobre, por tanto:

$$\text{Peso total de cobre} = \text{Vol} \times \rho_{cu} \quad (4.17)$$

El volumen de cobre se expresará en dm^3

$$\text{Vol} = L_{\text{total}} \times S_{\text{estator}} = 2947.68 \times 10 \times 0.00448 = 132.056 \text{ dm}^3$$

Sustituyendo el valor del volumen en la ecuación 4.17 y sabiendo que el peso específico del cobre es igual a 8.90 kg/dm^3 , se obtiene:

$$\text{Peso total de cobre} = 132.056 \times 8.90 = 1175.30 \text{ Kg}$$

5. ESTUDIO DEL DEV. DE EXCITACIÓN DEL ROTOR

5.1 Introducción:

En este apartado estudiaremos todos los datos relativos al devanado del rotor, siguiendo un planteamiento parecido al que se ha utilizado para el estudio del estator.

Aunque los resultados difieren, los conceptos son parecidos y existe similitud en los cálculos. Como en el apartado anterior hallaremos parámetros tales como la longitud de cable que hace falta para bobinar todo el devanado, el peso de este cobre, la resistencia total que ofrece el cobre y la reactancia de todo el devanado. También se expresarán algunos datos en por unidad, puesto que en muchos casos interesa saber dicho valor.

En primer lugar se hallará el número de espiras por rama y por polo, además de otros datos de interés sobre el devanado.

5.2 Cálculo del número de espiras por rama y polo.

En primer lugar se calculará el número de ranuras que abarca un polo. Este número se obtiene de la siguiente relación:

$$\text{ranuras por polo} = \frac{Z}{2} \quad (5.1)$$

El número de ranuras totales es dato conocido (dato 2.7) que son 120 divisiones, de las cuales se ranurarán las necesarias, y el número de polos es igual a dos veces el número de pares de polos, dato hallado en el apartado 3c, que sale 8 polos. Sustituyendo en la ecuación 5.1, se obtiene:

$$= 15 \text{ ranuras por polo.}$$

En esta máquina sólo hay 10 ranuras bobinadas por polo, es decir, que si se tienen 8 polos habrá 80 ranuras

bobinadas de las 120 divisiones totales.

Para calcular el número de espiras por fase y por polo en primer lugar hay que calcular el número de conductores que hay por polo. Para calcular este número se multiplicará el número de ranuras bobinadas (dato 7.5) por el número de conductores que hay en una ranura (dato 7.3):

$$10 \times 22 = 220 \text{ conductores por polo}$$

Al igual que como se vio en el estator, una espira está formada por dos conductores. Si se divide el número de conductores por polo entre dos, se obtiene el número de espiras por polo:

espiras por polo

El número de espiras por rama y polo se obtendrá de dividir el número de espiras por polo entre el número de circuitos paralelos (dato 7.4):

espiras por rama y polo

Para poder comprender estos últimos datos obtenidos se puede observar en la siguiente figura el esquema eléctrico del devanado del rotor.

Devanado es monofásico.

5.3. Cálculo de la longitud del conductor medio.

Para el cálculo de la longitud del conductor medio se utilizará la siguiente ecuación:

$$L_{cm} = L_{hierro} + 2 \times \text{saliente} + L_{cbm} \text{ (5.2)}$$

Para el cálculo de la longitud se dispone de la siguiente figura para mejor comprensión de los cálculos a realizar, a través de este esquema simple:

Al igual que en el estator, se puede ver que hay algunos valores que son datos, entonces:

$$L_{hierro} \text{ (dato 2.5)} + \text{longitud de los canales radiales (dato 2.9)} = 1050 + 16 \times 12 = 1242\text{mm.}$$

$$2 \text{ salientes rectos (dato 7.6)} = 2 \times 80 = 160 \text{ mm}$$

Cabeza bobina media = ¿

Para calcular la longitud de la cabeza de bobina media, se debe calcular en primer lugar el paso de ranura del rotor, que responde a la siguiente ecuación:

$$r_r = \text{ (5.3)}$$

Como el diámetro exterior del rotor no es dato, se deberá hallar restando al diámetro interior del estator (dato 2.2) el entrehierro radial (dato 2.3). Además, a este resultado se le debe restar la altura de una ranura (dato 4.5) ya que se quiere hallar el paso en la mitad de la ranura, por tanto, el diámetro que se utilizará en la ecuación 5.3 será:

$$D = D_{ie} - 2 \times r_{ad} - h_r$$

$$D = 1450 - 2 \times 6 - 110 = 1328 \text{ mm}$$

Una vez obtenido el diámetro que se va a utilizar, es necesario recordar que el número de ranuras que se va a utilizar en la ecuación es el dato 2.7, es decir, 120 ranuras. Se utiliza este dato porque las ranuras se distribuyen uniformemente por toda la circunferencia. Sustituyendo en la ecuación 5.3, se obtiene:

$$r_r = \text{mm}$$

Una vez hallado este valor se procederá al cálculo de la longitud de la cabeza de bobina de esa posición. Como se puede observar en la figura anterior, nosotros conocemos la distancia de la ranura 3 a la 4, que será igual a 34.767 mm. Por otra parte, podemos desarrollar el siguiente triángulo rectángulo.

Donde uno de los catetos será esa distancia de 3 a 4; el otro cateto sería la suma de anchura de la ranura (dato 4.4) más la distancia entre bobinas sucesivas (dato 7.7). De tal forma que podemos sacar para esa posición el valor del ángulo, por trigonometría.

$$\text{sen } =$$

$$= 43.65^\circ$$

Como se ha podido observar en la figura anterior, la cabeza de bobina que está en la situación intermedia es la que va desde la ranura 3 a la ranura 13, es decir, hay 10 ranuras entre ambas.

$$D'' = 10 \times r_r = 10 \times 34.767 = 347.67 \text{ mm.}$$

Conociendo ese ángulo $= 43.65^\circ$, y la distancia de la ranura 3 a la trece, podemos determinar el valor de la longitud de cabeza de bobina media. Para lo cual, se puede suponer el siguiente triángulo:

$$L_{cb} = \text{mm}$$

Luego la longitud de conductor medio será igual a la suma de L_{hierro} (dato 2.5) + longitud de los canales radiales (dato 2.9) más 2 salientes rectos (dato 7.6) más Cabeza bobina media $= 1050 + 16 \times 12 + 2 \times 80 + 480.50 = 1882.50 \text{ mm.}$

2.5. Cálculo de otras longitudes.

Al igual que en el estator, existen otras longitudes que pueden ser de interés para otros cálculos, o bien como datos a tener en cuenta. Así pues, se va a proceder al cálculo de la longitud de una bobina, de la longitud de conductor que hay por polo, la longitud total de conductor y las longitudes que aportarán la pletina.

Para el cálculo de la longitud de una bobina, se sabe que esta está compuesta por espiras, que a su vez están compuestas por conductores medios. Entonces la longitud vendrá dada por la siguiente relación:

$$\text{Long. de una bobina} = 2 \times l_{cm} \times n^\circ \text{ espiras por rama y polo (5.5)}$$

Todos los elementos de la ecuación son datos anteriormente calculados. La longitud del conductor medio está calculada en el apartado 5.3 y el número de espiras por rama y polo, en el apartado 5.2. Entonces, si se sustituye en la ecuación 5.5, se obtiene:

$$\text{Long. de una bobina} = 2 \times 1.88250 \times 55 = 207.075 \text{ m.}$$

Para el cálculo de la longitud de conductor por polo se debe multiplicar la longitud de una bobina por el

número de circuitos paralelos que hay en el rotor. La expresión de la que se obtiene dicha longitud:

Lon. por polo = long. de una bobina x nº de circuitos paralelos (5.6)

La longitud de una bobina es el resultado más reciente y el número de circuitos paralelos es el dato 7.4, entonces, si se sustituye en la ecuación 5.6, se obtiene:

Lon. por polo = $207.075 \times 2 = 414.15 \text{ m}$

La longitud total de conductor empleado para bobinar todo el devanado se obtiene multiplicando la longitud por polo por el número de polos, como indica la siguiente ecuación:

Long. total = Lon. por polo x Nº de polos (5.7)

La longitud por polo es el último resultado que se ha hallado, en este apartado y el número de polos es el doble del número de pares de polos, dato hallado en el apartado 3c. Por tanto, la longitud total será:

Long. total = $414.15 \times 8 = 3313.2 \text{ m}$.

Al igual que en el estator, el rotor está compuesto por pletina, de una determinada característica:

– Pletina 1: La longitud de la pletina 1 será nº de conductores x Long. total; es decir $1 \times 3313.2 = 3313.2$ metros.

5.5 Cálculo de la resistencia.

Al igual que en el estator, para el cálculo de la resistencia se utilizará la siguiente ecuación:

$R_{\text{bobina}} = (5.8)$

a) donde σ es la conductividad del cobre, que a 20° C es $56 \text{ mm}^2 / \text{Ohm m}$

b) L_{bobina} es la longitud de una rama, en este caso dicha longitud es 207.075 m.

c) S_{rotor} es la sección del conductor, que será $3.5 \times 15 = 52.5 \text{ mm}^2$

d) C_t es el coeficiente de temperatura, que es igual al hallado cuando se calculó la resistencia del estator, es decir, 1.31.

Sustituyendo los valores en la ecuación 5.8 obtendremos el valor de la resistencia de una bobina:

$R_{\text{bobina}} = \text{Ohm}$

Para saber cuál es la resistencia por polo tendremos que dividir la resistencia de una bobina entre el número de paralelos que tiene un polo.

$R_{\text{polo}} = \text{Ohm}$

Si nuestra máquina tiene 8 polos y 0.04613 Ohm por polo; la resistencia total será:

$R_T = 0.04613 \times 8 = 0.360 \text{ Ohm}$

5.6. Cálculo de la resistencia referida al estator.

Como paso previo al cálculo de la resistencia en por unidad, se debe referir la resistencia a los valores del estator. Para ello se deben igualar las potencias eléctricas y las fuerzas magnetomotrices de ambos devanados. En el siguiente sistema de ecuaciones se puede ver la que se acaba de decir:

$$FMM_{\text{rotor}} = FMM_{\text{estator}}$$

(5.9)

$$P_{\text{rotor}} = P_{\text{estator}}$$

(5.10)

Donde:

- N_{rot} : es el número de espiras en serie por polo, hallado en el apartado 5.2, 55 espiras.
- $\text{dev} / \text{rotor}$: factor de devanado del rotor. Como ya vimos en el cálculo del factor de devanado del estator, dicho factor está compuesto por dos factores: de distribución y el de paso.

$$\text{dev} = \text{dist} \times \text{paso} \quad (5.11)$$

En los devanados monofásicos el factor de paso se toma como 1. El factor de devanado será igual al factor de distribución:

$$\text{dev} = \text{dist} =$$

Donde K_{bp} es el número de ranuras bobinadas por polo (dato 7.5) y K_b es el número de ranuras por polo (apartado 5.2).

$$\text{dev} = \text{dist} = \text{Sen} = 0.8285$$

- I_{rotor} : intensidad de excitación del rotor.
- N_{est} : número de espiras en serie por fase, hallado en el apartado 3 g; 60 espiras.
- dev / est : Factor de devanado del estator. Calculado en el apartado 3d; 0.9235.
- I_{rotor}' : intensidad de excitación del rotor, referido al estator.
- R_{rotor} : resistencia total del rotor.
- R_{rotor}' : resistencia del rotor referida al estator.
- p : número de pares de polos, dato hallado en el apartado 3c, 4 pares de polos.
- q : número de fases, 3.

Si en la ecuación 5.9 se sustituyen los datos conocidos y se reorganiza de tal forma que la intensidad del rotor referida al estator quede en función de la intensidad del rotor:

$$I_{\text{rotor}}' = 2.437 I_{\text{rotor}}$$

Si se sustituye los datos conocidos en la ecuación 5.10 se obtiene una expresión como la siguiente:

$$R_{\text{rotor}} \times I_{\text{rotor}}^2 = 3 \times R_{\text{rotor}}' \times I_{\text{rotor}}'^2$$

$$R_{\text{rotor}}' = 1/3$$

$$R_{\text{rotor}}' = R_{\text{rotor}} 0.056 \quad (5.12)$$

Por tanto, se ha obtenido una expresión que refiere las impedancias del rotor al estator. Por tanto, la resistencia total del rotor, hallada en el apartado 5.5, referida al estator será:

$$R_{\text{rotor}}' = 0.360 \times 0.056 = 0.02016 \text{ Ohm}$$

5.7. Resistencia del rotor referida al estator en por unidad.

Al igual que ocurría con las impedancias del estator, las del rotor también han de ir normalizadas, por tanto, sabiendo la impedancia base, hallada en el apartado 4.6, se puede decir que la resistencia del rotor referida al estator en por unidad será:

$$R'_{\text{pu}} = 0.004612 \text{ pu.}$$

5.8. Cálculo de la reactancia del rotor.

Para el cálculo de este parámetro se utilizará la siguiente ecuación:

$$X_{\text{fase}} = \quad (5.13)$$

Donde:

- f: es la frecuencia de la red, 50 Hz.
- Nrot : es el número de espiras en serie por polo, dato hallado en el apartado 5.2, 55 espiras.
- p: es el número de pares de polos, dato hallado en el apartado 3; 4 pares de polos.
- Kbp : es el número de ranuras bobinadas por polo, dato 7.5. 10 ranuras.
- L: es la longitud total del estator, es decir, hierro más canales de ventilación radiales, dato hallado en el apartado 4.2, 1242 mm.
- equi : es la permeancia equivalente de la ranura. Dicha permeancia es la suma de tres permeancias parciales: de ranura, en zigzag y de la cabeza de bobina.

Para calcular dicha permeancia se dispone, como el cálculo de la permeancia del estator, de la ecuación 4.7.

En primer lugar se obtendrá el valor de la permeancia de ranura. La ranura del rotor es de tipo semicerrada, pudiéndose dividir en tres zonas, como se indica la siguiente figura:

Al igual que en el estator la permeancia total de la ranura será la suma de las tres zonas. Por tanto, se utilizará la misma ecuación que en el caso del estator, es decir, la ecuación 4.8.

$$\text{ranura} = I + II + III \quad (4.8)$$

Para cada zona se tiene una ecuación distinta, obtenidas del libro de Juan Corrales Martín Cálculo industrial de máquinas eléctricas, Tomo I.

$$\text{--Zona I: } I = (5.14)$$

$$\text{--Zona II: } II = (5.15)$$

$$\text{--Zona III: } III = (5.16)$$

En la figura se pueden ver que son cada uno de los datos que aparecen en las ecuaciones.

Si se sustituyen los valores, se obtienen las permeancias quedando de la siguiente forma:

$$\text{--Zona I: } I = 1.8981 \text{ Mx/Gb / cm}$$

$$\text{--Zona II: } II = 0.3846 \text{ Mx/Gb / cm}$$

$$\text{--Zona III: } III = 0.312 \text{ Mx/Gb / cm}$$

Si estos valores se sustituyen en la ecuación 4.8 se obtendrá la permeancia de la ranura, quedando, por lo tanto:

$$\text{ranura} = 1.8981 + 0.3846 + 0.312 = 2.5947 \text{ Mx/Gb / cm}$$

$$\text{-- zigzag} = (5.17)$$

$$\text{-- cabeza de bobina} = (5.18)$$

Si se sustituyen los datos, quedarán:

$$\text{-- zigzag} = \text{Mx/Gb / cm}$$

$$\text{-- cabeza de bobina} = \text{Mx/Gb / cm}$$

Una vez obtenidas todas las permeancias parciales se sustituyen en la ecuación 4.7, para obtener la permeancia total:

$$\text{equi} = 2.5947 + 0.469 + 1.4815 = 4.5452 \text{ Mx/Gb / cm}$$

Una vez que se conocen todos los datos que aparecen en la ecuación 5.13 se sustituye y se obtiene la reactancia de dispersión por fase:

$$X_{\text{fase}} = \text{Ohm}$$

5.9. Cálculo de la reactancia referida al estator.

Al igual que en el caso de la resistencia es necesario dar el valor de la reactancia referida al estator, utilizando para ello la ecuación obtenida en el apartado 5.6, es decir, la ecuación 5.12.

$$R_{\text{rotor}}' = R_{\text{rotor}} 0.056$$

Por lo tanto, si se sustituye la resistencia por reactancia se obtendrá el valor de esta referida al estator:

$$X_{\text{rotor}}' = 21.57 \times 0.056 = 1.2079 \text{ Ohm}$$

5.10. Reactancia del rotor referida al estator en por unidad.

Al igual que ocurría con las impedancias del estator, las del rotor también han de ir normalizadas, por tanto, sabiendo la impedancia base, hallada en el apartado 4.6, se puede decir que la reactancia del rotor referida al estator en por unidad será:

$$X_{\text{rotor}}'_{\text{pu}} = \text{pu}$$

5.11. Cálculo del peso de cobre.

Para el cálculo del peso se utiliza el mismo procedimiento que en el cálculo del peso en el estator, variando solamente los datos.

$$\text{peso total de cobre} = \text{Vol} \times \rho_{\text{Cu}} \quad (5.12)$$

$$\text{Vol} = S_{\text{rotor}} \times L_{\text{total}} = 0.00525 \times 33132 = 173.943 \text{ dm}^3$$

Sustituyendo el valor del volumen en la ecuación 5.11 y sabiendo que el peso específico del cobre es igual a 8.9 Kg / dm³, se obtiene:

$$\text{peso total de cobre} = 173.943 \times 8.9 = 1548.10 \text{ Kg.}$$

6. CARACTERÍSTICAS DE VACÍO.

6.1. Introducción.

En este apartado comienza el estudio magnético de la máquina. Para hallar la curva de vacío es necesario calcular las inducciones y las fuerzas magnetomotrices que se producen en cada una de las partes que forman el circuito magnético. Cada parte se estudiará por separado, ya que cada una tiene una forma distinta de hallarse. Después de hacer los cálculos, se tomarán cinco valores (25%, 50%, 75%, 100%, 125%) para poder representar la curva característica de vacío.

6.2. Análisis en el entrehierro.

En este apartado se estudia el espacio comprendido entre el estator y el rotor. En primer lugar se hallará el flujo del cual se obtendrá la inducción y a continuación se hallará la fuerza magnetomotriz que se genera en dicho espacio.

6.2.a) Cálculo del flujo máximo por polo.

Para el cálculo del flujo se utilizará la siguiente ecuación:

$$(6.1)$$

Todos los valores de cada uno de los elementos de la ecuación fueron hallados en el apartado 3. Por tanto, el flujo será:

$$\text{Wb}$$

6.2.b) Cálculo de la inducción en el entrehierro.

Para el cálculo de la inducción media en el entrehierro utilizaremos la siguiente ecuación:

$$(6.2)$$

Conociendo el valor del paso polar, a través de la siguiente ecuación:

$$m$$

Todos los valores de los elementos de la ecuación 6.2 fueron ya calculados en el apartado 3. Sustituyendo, se obtiene:

$$T$$

Una vez hallada la inducción media, multiplicando esta por el factor $\sqrt{2}$, se obtiene la inducción máxima:

$$B_{\text{maxima}} = B_{\text{media}} \times \sqrt{2} = 0.4532 \times \sqrt{2} = 0.7119 \text{ T, que serán } 7119 \text{ G}$$

6.2.c) Cálculo de la excitación magnética en el entrehierro.

Una vez hallada la inducción, se continuará con el cálculo de la excitación magnética, que en el entrehierro viene dada por la siguiente ecuación:

$$H = (6.4)$$

en el sistema CGS es 1, por tanto, obtendremos el valor de excitación magnética en Oersted. Sustituyendo en la ecuación 6.4:

$$H = 7119 \text{ Oe.}$$

Para obtener el valor en el Sistema Internacional se debe multiplicar el resultado por el factor 10^{-4} para que el resultado este en las unidades deseadas. Por tanto, el resultado será el siguiente:

$$H = 7119 \times 10^{-4} = 5665.12 \text{ A} \cdot \text{v} / \text{cm}$$

6.2.d) Cálculo de la fuerza magnetomotriz en el entrehierro.

Para el cálculo de la fuerza magnetomotriz se utiliza la siguiente ecuación:

$$FMM = H \times L_{\text{fec}} \quad (6.5)$$

Como el espacio comprendido entre el rotor y el estator, el entrehierro, no es constante en toda la circunferencia debido a las gargantas de las ranuras, se deben aplicar unos coeficientes llamados coeficientes de Carter. Por tanto, la longitud efectiva del entrehierro será:

$$L_{\text{fec}} = l \times K_c \quad (6.6)$$

Donde l es la longitud de entrehierro radial y K_c es el coeficiente de Carter equivalente, es decir, al compuesto por los tres coeficientes parciales de los tres tipos de ranuras, es decir:

$$K_c = K_{c1} \times K_{c2} \times K_{c3} \quad (6.7)$$

La ecuación general para hallar el coeficiente de Carter es la siguiente:

(6.8)

Donde r es el paso de ranura; l_e es la longitud del entrehierro y a es la anchura de la garganta. Ahora se procederá al calculo de los coeficientes de Carter para cada una de las ranuras utilizando la ecuación 6.8.

– Estator:

– Excitación del rotor:

– Amortiguación del rotor:

Pudiendo suponer casi igual a 1, ya que en este caso apenas tiene influencia.

Una vez calculados los distintos coeficientes de Carter, se sustituye en la ecuación 6.7 y se obtiene el coeficiente de Carter total:

$$K_c = 1.199 \times 1.00 \times 1.00 = 1.199$$

Por tanto, si se sustituye en la ecuación 6.6 se obtendrá la longitud efectiva de entrehierro:

$$L_{efec} = 6 \times 1.199 = 7.194 \text{ mm} = 0.7194 \text{ cm}$$

Una vez obtenida la longitud efectiva de entrehierro, se sustituyen en la ecuación 6.5 los valores hallados en el apartado anterior, la excitación magnética y la longitud de entrehierro, obteniéndose:

$$FMM = 5665.12 \times 0.7194 = 4074.77 \text{ Av.}$$

6.3. Analisis de los dientes del estator.

6.3.a) Cálculo de la inducción en los dientes del estator.

En este apartado se estudia el espacio comprendido entre dos ranuras consecutivas, siendo esta zona todo hierro. Para el estudio de esta zona se tomarán dos hipótesis:

1. Todo el flujo de ranura en el entrehierro circulará por el diente. Esto ocurrirá cuando la permeabilidad del hierro sea mucho mayor que la del aire. Esta hipótesis se cumplirá si la inducción en el diente no supera los 18000 Gauss.
2. El flujo de ranura del entrehierro se dividirá en dos, uno por el diente y otro por la ranura del estator. Esta hipótesis se cumplirá cuando la inducción supere los 18000 Gauss.

En la figura se ha podido ver un detalle del diente y el punto donde se va a calcular la inducción (punto I), que es punto más significativo de la geometría del diente.

En primer lugar se verá si se cumple la primera hipótesis. Suponiendo que todo el flujo del entrehierro circula por el diente, se igualarán los flujos del entrehierro y del diente, quedando la siguiente ecuación:

$$\Phi_{\text{ranura}} = \Phi_{\text{entrehierro}} = B_{\text{max}} \times r_e \times L_t = B_{\text{di}} \times d_i \times L_{\text{fe efectiva}} \quad (6.8)$$

Los cálculos de los términos de la ecuación se detallan a continuación:

– r_e : paso polar de ranura del estator. Su valor viene dado por la siguiente ecuación:

mm

– L_t : Longitud total de la máquina, hierro más canales de ventilación:

$$L_t = 1050 + 16 \times 12/2 = 1146 \text{ mm}$$

– L_{fe} efectiva : longitud efectiva del hierro. Longitud de hierro por el factor de apilamiento (dato 2.10).

$$L_{fe} \text{ efectiva} = 1050 \times 0.95 = 997.5 \text{ mm}$$

– d_i : paso de ranura del estator en el punto I, es decir, el paso de ranura pero con el diámetro en el punto I menos la anchura de una ranura (dos veces la mitad de la anchura de una ranura). Por tanto:

$$d_i = r_i - \text{anchura ranura} = \text{mm}$$

– B_{max} : inducción del entrehierro, hallada en el apartado 6.2 b; 7119 G.

Despejando de la ecuación 6.8 la inducción en el diente y sustituyendo los valores que se acaban de exponer, se obtiene la siguiente ecuación:

G

Viendo claramente que al salir dicha inducción menor que 18000 G, el diente no estará saturado. Luego se cumple toda la hipótesis 1, que hemos supuesto; es decir, que todo el flujo circulará únicamente por el diente.

6.3.b) Cálculo de la excitación magnética en los dientes del estator.

Para el cálculo de la fuerza magnetomotriz vamos a utilizar un catálogo de chapas para ver qué valor excitación magnética podemos necesitar para la inducción anterior. Para lo cual vamos a coger el catálogo de chapas y flejes magnéticos de J.Ma. de Aristrain SA, y utilizando el dato 2.11; chapa de características 1.7 w/kg.

Saliendo un resultado de 6.81 Oe. Para pasarlo a unidades del Sistema Internacional habrá que multiplicarlo por el factor $10 / 4$. Obteniendo el siguiente resultado; 5.42 Av/cm.

6.3.c) Cálculo de la fuerza magnetomotriz en los dientes del estator.

Para el cálculo de la fuerza magnetomotriz se utilizará la misma ecuación que se utilizó en el apartado 6.2.d, es decir, la ecuación 6.5:

$$FMM_{die} = H_{die} \times L \text{ (6.11)}$$

En el cálculo de las ranuras la longitud es la altura de estas (dato 3.2), obteniéndose, por tanto, la fuerza magnetomotriz en las ranuras:

$$FMM_{die} = 5.42 \times 8.50 = 46.07 \text{ Av}$$

6.4. Análisis de los dientes del rotor.

El rotor está formado por dos zonas, una donde existen ranuras de excitación y amortiguación y otra donde

sólo existen ranuras de amortiguación. En el estudio de la máquina no se tomará en cuenta la segunda zona, llamada diente gordo. Por tanto, el estudio se centrará en el estudio de los dientes, zonas de hierro entre las ranuras.

6.4.a) Cálculo de la inducción en los dientes del rotor.

Se sabe que la inducción máxima de entrehierro, que no es constante, se da en el diente gordo (esta inducción máxima se da cuando el ángulo eléctrico es 90°) pero como ese diente no se va a estudiar se calculará la inducción en el diente más próximo a este, que es el diente más desfavorable. Se calculará el ángulo eléctrico, obteniéndose la inducción en dicho diente multiplicando la inducción máxima de entrehierro por el seno del ángulo eléctrico.

Una vez obtenida esta inducción se harán las mismas hipótesis que en el estator. En la siguiente figura se puede observar de qué forma esta dividido el rotor. También se puede ver cuál es el diente más desfavorable y, de forma intuitiva, cuál es la inducción a la que está sometido.

Para el cálculo del ángulo eléctrico es necesario saber cuál es el ángulo eléctrico entre ranuras, que viene dado por la siguiente expresión:

$$e_r = g \times p = (360/120) \times 4 = 12^\circ$$

El ángulo eléctrico del diente más desfavorable será la distancia en ranuras que hay desde la línea neutra hasta el punto señalado por el ángulo eléctrico entre ranuras. Dicha distancia es de 3 ranuras y media, pero para hacer más desfavorable el cálculo se supondrá que dicha distancia es de 4 ranuras. Por tanto, dicho ángulo vale: $12 \times 4 = 48^\circ$, que será para el diente más desfavorable.

La inducción en el diente será:

$$B = B_{\max} \times \sin e = 7119 \times \sin 48 = 5290.49 \text{ G}$$

Al igual que en el estator se supondrán dos hipótesis. Como en aquel caso se verá si la inducción calculada es superior a 18000 G. La expresión para el cálculo de la inducción es la misma que se utilizó para el estudio del estator, la ecuación 6.8, pero con las diferencias que implica el trabajar con el rotor.

$$B \times r_r \times L_t = B_{\text{dirotor}} \times d_{\text{dirotor}} \times L_{\text{fe efectiva}} \quad (6.12)$$

Algunos elementos (las longitudes) que aparecen en la ecuación fueron hallados cuando se estudió la misma hipótesis en el estator, en el apartado 6.3 a). Los cálculos de los otros términos que aparecen en la ecuación se detallan a continuación:

– r_r : paso de la ranura en el rotor. Su valor viene dado por la siguiente expresión:

mm

– d_{dirotor} : Paso de la ranura en el punto I, es decir, el paso de la ranura pero con el diámetro del punto I menos la anchura de una ranura (dos veces la mitad de la anchura de una ranura). Por tanto:

$$d_{\text{dirotor}} = r - \text{anchura ranura} =$$

– B: inducción en el diente más desfavorable: 5290.49 G

Sustituyendo en la ecuación 6.12 resulta que la inducción en el diente más desfavorable será:

$$5290.49 \times 37.65 \times 1146 = B_{\text{dirotor}} \times 15.81 \times 997.5$$

G

Cumpliendo todas las hipótesis supuestas.

6.4.b) Cálculo de la excitación magnética en los dientes del rotor.

La excitación magnética se obtiene de las curvas de magnetización obtenidas del Catálogo de chapa, bobina y fleje magnético de J.M.Aristrain SA. En el rotor se dispone de chapa negra, que es la chapa con peores características magnéticas, siendo esta calidad de 3.6 (dato 2.12).

La excitación obtenida viene dada en Oersted, debiéndose hacer un cambio de unidades para poder hacer el cálculo de la fuerza magnetomotriz. Entrando en la curva con el valor obtenido de inducción, se obtiene un valor de excitación igual a 5.62 Oersted, que una vez hecha la conversión se tiene que la excitación magnética es:

$$H_{\text{dirotor}} = 5.62 \times 103 / 4 = 447.22 \text{ Av / m}$$

$$H_{\text{dirotor}} = 4.4722 \text{ Av / cm}$$

6.4.c) Cálculo de la fuerza magnetomotriz en los dientes del rotor.

Para el cálculo de la fuerza magnetomotriz se utilizará la misma ecuación que se utilizó en el apartado 6.2 d) y 6.3 c), es decir, la ecuación 6.5:

$$FMM_{\text{dirotor}} = H \times L \text{ (6.13)}$$

En el cálculo de las ranuras la longitud es la altura de estas (dato 4.5), obteniéndose, por tanto, la fuerza magnetomotriz en las ranuras:

$$FMM_{\text{dirotor}} = 4.4722 \times 11 = 49.1942 \text{ Av}$$

6.5. Análisis en la corona del estator.

6.5.a) Cálculo de la inducción en la corona del estator.

La inducción en la corona es la que se debe a la mitad del flujo polar, ya que el flujo polar se divide en dos partes iguales al llegar a la corona. Por tanto, el flujo que hay en la corona será:

El flujo máximo fue hallado en el apartado 6.2a), entonces si se sustituye en la ecuación se obtiene:

Wb

Para hallar la inducción en la corona se recurre a la siguiente relación:

$$\text{(6.14)}$$

La superficie de la corona del estator, es la que se considera que atravesará el flujo, por tanto, será la sección longitudinal:

$$S_{\text{ce}} = h_{\text{ce}} \times L_{\text{fe}} \text{ efec (6.15)}$$

La longitud de hierro efectiva ya se ha calculado, siendo su valor de 997.50 mm. La altura de la corona se obtendrá de restarle el radio exterior del estator el radio interior de este y la altura de las ranuras. De esta forma se obtiene la siguiente ecuación de la cual se deduce el valor de la altura de la corona del estator:

$$hce = R_{ext\ est} - R_{int\ est} - h_{ran}$$

$$hce = mm$$

Sustituyendo en la ecuación 6.15 se obtiene la superficie de corona del estator.

$$S_{ce} = 127.5 \times 997.5 = 127181.25 \text{ mm}^2 = 0.127181 \text{ m}^2$$

Por tanto, sustituyendo en la ecuación 6.14 se obtendrá el valor medio de la inducción en teslas, que pasando a unidades, se obtendrá en Gauss.

$$T = 11625.164 \text{ G}$$

6.5.b) Cálculo de la excitación magnética en la corona del estator.

Al igual que se ha hecho en apartados anteriores, la excitación magnética se obtiene de las curvas de magnetización obtenidas del Catálogo de chapa, bobina y fleje magnético de J.M. Aristrain SA. Por tanto, la curva es la de calidad 1.7 (dato 2.11).

Una vez que se ha obtenido de la curva el valor de la excitación en Oersted y haciendo el cambio de unidades pertinente, dicha excitación será:

$$H = 2.61 \text{ Oe} = 2.077 \text{ Av} / \text{cm}$$

6.5.c) Cálculo de la fuerza magnetomotriz en la corona del estator.

Para el cálculo de la fuerza magnetomotriz se utilizará la ecuación utilizada en otras ocasiones, la ecuación 6.5:

$$FMM_{ce} = H_{ce} \times L_{media} \text{ (6.16)}$$

Como en el cálculo del circuito magnético solo se estudia de la línea polar a la línea neutra, la longitud será igual a la 16° parte de la longitud de la circunferencia de radio igual al radio exterior menos la mitad de la altura de la corona del estator. Dicho radio es igual a:

$$R_{medio} = mm$$

La longitud de la circunferencia entera será:

$$L = 2 \times R_{medio} = 2 \times 873.75 = 5489.93 \text{ mm}$$

Por tanto, la longitud media, es decir, la necesaria para calcular la fuerza magnetomotriz será:

$$L_{media} = mm = 34.3121 \text{ cm}$$

Si se sustituye en la ecuación 6.16, se obtendrá que la fuerza magnetomotriz es igual a:

$$FMM_{ce} = 2.077 \times 34.3121 = 71.266 \text{ Av}$$

6.6. Análisis en la corona del rotor.

6.6.a) Cálculo de la inducción en la corona del rotor.

El flujo que circula por el estator será el mismo que el que circule por rotor, por tanto, se puede decir que se cumple la siguiente relación: que la relación entre inducciones y alturas de las coronas permanece constante. Siguiendo la relación se puede observar que:

$$B_{ce} \times h_{ce} = B_{cr} \times h_{cr} \quad (6.17)$$

Los datos del estator fueron hallados en el apartado anterior (apartado 6.5 a)). Para el cálculo de la altura de la corona del rotor se utilizará la siguiente ecuación:

$$h_{cr} = R_{ext\ rot} - R_{int\ rot} - h_{ran} = 71.50 \text{ mm}$$

Una vez calculada la altura de la corona del rotor, único dato que faltaba por hallar en la ecuación 6.17, se despejará y se sustituirán los valores en dicha ecuación y se obtiene que la inducción en la corona del rotor es:

$$B_{cr} = T = 20720 \text{ G}$$

6.6.b) Cálculo de la excitación magnética en la corona del rotor.

Como se puede observar, la gráfica que tenemos se ha quedado muy pequeña para mirar valores tan altos de inducción. Para ello vamos a suponer que a partir de 19000 G; la curva se convierte en una línea recta; que responde a la siguiente ecuación:

$$B - B_1 = (6.18)$$

Se tomarán dos puntos de la gráfica en la zona alta y que no estén muy alejados entre sí y sustituiremos en la ecuación 6.18.

Hay que recordar que el tipo de curva será una curva de 3.6.

– Punto 1: $B_1 = 19500 \text{ G}$; $H_1 = 171.44 \text{ Av/cm}$

– Punto 2: $B_2 = 20000 \text{ G}$; $H_2 = 207.71 \text{ Av/cm}$

Sustituyendo todos estos valores en la ecuación 6.18, se obtiene los siguiente:

$$B = 19500 + 5999.165 \times$$

De tal forma que si sustituimos el valor de B, por los 20720 G. se obtiene una aproximación de la excitación magnética.

$$H = 273.825 \text{ Av/cm}$$

6.6.c) Cálculo de la fuerza magnetomotriz en la corona del rotor.

Para el cálculo de la fuerza magnetomotriz se utilizará la ecuación utilizada en otras ocasiones, la ecuación 6.5:

$$F_{MMcr} = H_{cr} \times L_{media} \quad (6.19)$$

Como en el cálculo del circuito magnético solo se estudia de la línea polar a la línea neutra, la longitud será igual a la 16° parte de la longitud de la circunferencia de radio igual al radio exterior menos la mitad de la altura de la corona del rotor. Dicho radio es igual a:

$$R_{\text{medio}} = 573.25 \text{ mm}$$

La longitud de la circunferencia entera será:

$$L = 2 \times R_{\text{medio}} = 2 \times 573.25 = 3601.836 \text{ mm}$$

Por tanto, la longitud media, es decir, la necesaria para calcular la fuerza magnetomotriz será:

$$L_{\text{media}} = 225.114 \text{ mm} = 22.5114 \text{ cm}$$

Si se sustituye en la ecuación 6.19, se obtendrá que la fuerza magnetomotriz es igual a:

$$F_{\text{MMcr}} = 273.825 \times 22.5114 = 6164.18 \text{ Av.}$$

La fuerza magnetomotriz hallada es teóricamente correcta, pero dicha fuerza magnetomotriz, en realidad, suele andar próxima entre un 20 % a un 30% de la fuerza magnetomotriz del entrehierro.

6.7. Cálculo de la reactancia de magnetización.

Para el cálculo de la reactancia de magnetización, que se representa como X_m se dispone de la siguiente ecuación:

$$X_m = (6.20)$$

Esta ecuación se cumple en vacío, ya que la intensidad está en cuadratura con la fuerza electromotriz, pudiéndose despreciar la resistencia del hierro que está en paralelo con la reactancia de magnetización, pues la resistencia es mucho mayor.

Para poder calcular la intensidad de excitación es necesario calcular la fuerza magnetomotriz total, es decir, la suma de todas las fuerzas magnetomotrices halladas hasta ahora. Por tanto, la fuerza magnetomotriz total será:

$$F_{\text{MMT}} = F_{\text{MM}} + F_{\text{MMdie}} + F_{\text{MMdirot}} + F_{\text{MMce}} + F_{\text{MMcr}} \quad (6.21)$$

Si se sustituyen todos los valores hallados en los apartados anteriores, se obtiene que la fuerza magnetomotriz total es:

$$F_{\text{MMT}} = 4074.77 + 46.07 + 49.194 + 71.27 + 6164.18 = 10405.48 \text{ Av}$$

Una vez obtenida la fuerza magnetomotriz total, se aplicará la siguiente ecuación para la obtención de la intensidad de excitación:

$$F_{\text{MMT}} = N \times \text{dev rotor} \times I_{\text{exc}} \quad (6.22)$$

Donde N es el número de espiras por rama y polo, dato calculado en el apartado 5.2. El factor de devanado del rotor también fue hallado con anterioridad, en el apartado 5.6. Por tanto, si se sustituye y despeja en la ecuación 6.21 los valores ya comentados, se obtiene la intensidad de excitación:

$$10405.48 = 55 \times 0.8285 \times I_{\text{exc}}$$

$$I_{exc} = 228.35 \text{ A}$$

Volviendo a la ecuación 6.20, la E es la fuerza electromotriz de la máquina, debiendo ser la fuerza electromotriz por fase. Por tanto, si se sustituye en la ecuación ya mencionada, se obtiene que la reactancia de magnetización es:

$$X_m = 15.93 \text{ Ohm}$$

Si se quiere obtener la inductancia, sólo habrá que sustituir los valores en la siguiente ecuación:

$$L_m = 0.0507 \text{ H}$$

6.8. Curva de vacío de la máquina.

Como ya se dijo, para construir la curva de vacío de la máquina se tomarán 5 puntos; 25%, 50%, 75%, 100% y 125% de las inducciones halladas. Los demás parámetros serán hallados a partir de la inducción hallada en cada zona. Los valores de inducción que sobrepasen los 18000 G se calcularán aparte, pues habrá pasado a una segunda hipótesis (para tema de los dientes del estator y del rotor). Una vez calculados los valores de las inducciones se obtendrán los valores de las excitaciones magnéticas y las fuerzas magnetomotrices. A partir de estas fuerzas se obtendrán las intensidades de excitación de los distintos puntos que junto con los puntos de las fuerzas electromotrices de vacío conformarán la curva de vacío.

Para el cálculo de las excitaciones magnéticas y de las fuerzas magnetomotrices se seguirán los mismos pasos seguidos cuando se calcularon los valores al 100%.

6.8.1. Entrehierro.

	B _{max} (Gauss)	H (Av / cm)	FMM
25%	1779.75	1416.00	1019.52
50%	3559.50	2832.56	2039.44
75%	5339.25	4248.84	3059.16
100%	7119.00	5665.12	4074.77
125%	8898.75	7081.40	5098.61

6.8.2. Dientes del estator.

	B _{die} (Gauss)	H _{die} (Av / cm)	FMM _{die}
25%	3384.30	0.000	0.000
50%	6768.60	0.716	6.086
75%	10152.91	1.082	9.197
100%	13537.21	5.420	46.07
125%	16921.51	79.60	676.6

Utilizando en cada caso la chapa 1.7 w/kg.

6.8.3. Dientes del rotor.

	B _{dirotor} (Gauss)	H _{dirotor} (Av / cm)	FMM _{dirotor}
25%	3618.50	0.000	0.000

50%	7237.00	0.964	10.604
75%	10855.50	1.261	13.870
100%	14474.00	4.472	49.194
125%	18092.50		

Viendo en el caso de 125%, que los dientes del rotor están saturados, es decir, que superan los 18000 Gauss. Entonces vamos a pasar a la segunda hipótesis, resolviendo el problema de la siguiente forma:

$$B_{\text{dirotor}} = (6.23)$$

De donde B'_{dirotor} es el valor hallado según la primera hipótesis, es decir, 18092.50 Gauss. Los valores del cociente fueron hallados para el cálculo del 100%, en el apartado 6.4. Donde $\phi = 1$, cuando la excitación magnética está en Oersted. El proceso a seguir será el siguiente:

1. Se supondrá un valor hallado de inducción, siendo este un valor un poco inferior al que hemos obtenido.
2. Con este valor se obtiene del catálogo de chapas 3.6, el valor de la excitación magnética.
3. Se vuelve a calcular la inducción utilizando la ecuación 6.23
4. Se comparan ambas inducciones. Si son iguales; la inducción y la excitación son correctas. Si, por el contrario, son distintas, se vuelve a repetir el proceso.

Vamos a sustituir todos los datos en la ecuación 6.23

$$B_{\text{dirotor}} =$$

$$B_{\text{dirotor}} = 18092.50 - 2.251 H_{\text{dirotor}}$$

El proceso de iteración se resume en el siguiente cuadro:

B_{dirotor} gráfico m-3.6 H_{dirotor} ecuación 6.23 B_{dirotor}

18000 100 17867.15

17800 82.54 17910.00

17900 96.23 17877.00

Por tanto, para el caso del 125% podemos suponer que la inducción será de unos 17900 Gauss y su excitación magnética de 96.23 Oe (76.57 Av / cm). La fuerza magnetomotriz que nos saldrá sería de unos: 842.30 Av

6.8.4. Corona del estator.

	Bce (Gauss)	Hce (Av / cm)	FMMce
25%	2906.3000	0.000	0.000
50%	5812.6000	0.000	0.000
75%	8718.8700	1.041	35.717

100%	11625.164	2.077	71.266
125%	14531.400	12.14	416.520

6.8.5. Corona del rotor.

	Bcr (Gauss)	Hcr (Av / cm)	FMMcr
25%	5180	0.000	0.00
50%	10360	1.214	28.37
75%	15540	9.640	225.45
100%	20720	273.825	6164.18
125%	25900		

Para el caso del 125%, al ver que nos sale más de 20000 Gauss, podremos utilizar el mismo caso del apartado 6.6 b. Para lo cual vamos a tener la siguiente ecuación que hemos sacado anteriormente:

$$B = 19500 + 5999.165 \times$$

Y sustituyendo el valor de B, podremos obtener un valor de H aproximado; saliendo en nuestro caso: 2009.14 Av / cm y fuerza magnetomotriz de la corona del rotor. 45205.7

La fuerza magnetomotriz hallada en este caso es teóricamente correcta, pero dicha fuerza suele andar próxima al 30% de la fuerza magnetomotriz del entrehierro.

6.8.6. Cálculo de las fuerzas magnetomotrizes totales.

Para poder calcular las intensidades de excitación es necesario obtener las fuerzas magnetomotrizes totales, siendo dichas fuerzas la suma de cada fuerza en cada parte de la máquina, como ya se ha indicado con esta ecuación:

$$FMMT = FMM + FMMdie + FMMdirot + FMMce + FMMcr$$

Por tanto, la suma total sería en cada punto:

$$- 25 \%: FMMT = 1019.52 + 0 + 0 + 0 + 0 = 1019.52$$

$$- 50 \%: FMMT = 2039.44 + 6.086 + 10.604 + 0 + 28.37 = 2084.5$$

$$- 75 \%: FMMT = 3059 + 9.197 + 13.87 + 35.717 + 225.45 = 3343.216$$

$$- 100 \% FMMT = 4074.77 + 46.07 + 49.194 + 71.27 + 6164.18 = 10405.48$$

$$- 125 \% FMMT = 5098.61 + 676.6 + 842.30 + 416.52 + 45205.7 = 52239.73$$

6.8.7. Cálculo de las intensidades de excitación.

Estas intensidades son las que aparecerán en el eje de las abscisas, y que se hallarán con la ecuación 6.22, utilizado en el apartado 6.7. Por tanto, para cada punto se aplicará la ecuación y se obtendrán las intensidades de excitación:

$$- 25 \%: I_{exc} = 22.37 \text{ A.}$$

- 50 %: $I_{exc} = 45.74 \text{ A}$
- 75 %: $I_{exc} = 73.37 \text{ A}$
- 100 %: $I_{exc} = 228.35 \text{ A}$
- 125 % : $I_{exc} = 1146.42 \text{ A}$

Una vez obtenidos todos los datos necesarios para construir la curva característica de vacío se presentan a continuación el siguiente cuadro resumen:

	25 %	50 %	75 %	100%	125 %
EJE X (A)	22.37	45.74	73.37	228.35	1146.42
EJE Y (V)	909.33	1818.65	2727.98	3637.31	4546.64

Ver capítulo de resumen de cálculos, capítulo 14. Evidentemente se cometerán algunos errores, a la hora de trazar y dibujar dicha curva, a mano. Con esto se reconoce que se ha podido cometer algún tipo de error. Siendo recomendable la utilización de algún programa informático, de trazado de curvas.

7. ANÁLISIS EN CARGA DE LA MÁQUINA.

7.1. Fuerza electromotriz necesaria en carga.

Una vez que se conecta carga a la máquina y se hace que trabaje a plena carga, hay que ver qué fuerza electromotriz hace falta para que la tensión en los bornes sea la nominal. Para ello se utilizará la siguiente ecuación:

$$E = U + (R + j X) \times I \quad (7.1)$$

Donde:

- E: es la fuerza electromotriz que se desea hallar, en fasores.
- U: es la tensión nominal por fase de la máquina, en fasor. Se tomará dicha magnitud como origen de fases.
- R: es la resistencia por fase del devanado del estator, hallado en el apartado 4.4
- X: es la reactancia por fase del devanado del estator, hallado en el apartado 5.5.
- I: es la intensidad nominal de carga, que se deducirá de la siguiente ecuación:

$$(7.2)$$

Donde P es la potencia de la máquina (dato 1.2), $\cos \phi$ es el factor de potencia (1.4 y 1.5). Dándonos los siguientes datos 6356 Kw y 0.70, inductivo. Si sustituimos en la ecuación 7.2, se obtiene el siguiente valor:

$$= 832.12 \text{ A} = I_{\text{fase}}$$

Como tiene un factor de potencia de 0.70 inductivo el vector intensidad estará retrasado respecto a la tensión, quedando de la siguiente forma:

$$I = A.$$

Una vez conocidos todos los datos que aparecen en la ecuación 7.1, se sustituye y obteniéndose la fuerza electromotriz buscada:

$$= V$$

7.2. Corriente de excitación en carga.

Para generar la fuerza electromotriz hallada en el apartado anterior es necesaria una intensidad de excitación que circule por el rotor. Dicha intensidad de excitación es la suma de la intensidad de excitación en vacío más la debida a la reacción de inducido. Lo enunciado queda reflejado en la siguiente ecuación:

$$I_{exc/total} = I_o + I' \quad (7.3)$$

La intensidad de excitación en vacío se obtiene de la curva de vacío hallada en el apartado 6. Entrando con la fuerza electromotriz obtenida se obtiene una intensidad de vacío aproximadamente:

$$I_o = A$$

El ángulo de la intensidad de vacío es 90 unidades mayor porque la intensidad de excitación en vacío debe ir adelantada 90° respecto a la fuerza electromotriz.

La intensidad de excitación debida a la reacción de inducido se obtendrá de la ecuación 5.9, es decir, de la igualdad de fuerzas magnetomotrices.

$$FMM_{rotor} = FMM_{estator}$$

$$N_{rot} \times I'_{dev/rotor} = 1.35 \times (5.9)$$

Las magnitudes que aparecen son las mismas que se utilizaron en el apartado 5.6, por tanto, la intensidad de excitación debida a la reacción de inducido es la siguiente:

$$55 \times 0.8285 \times I' = 1.35 \times$$

$$I' = 341.501 \text{ A}$$

Como la máquina es netamente inductiva la reacción de inducido es longitudinal y opuesto, por tanto, la intensidad I' deberá ser opuesta a la intensidad de carga I :

$$I' = A$$

Por tanto, si se sustituyen en la ecuación 7.3 se obtiene la intensidad de excitación total:

$$I_{exc/total} = A$$

En la siguiente figura se puede ver el diagrama fasorial de la máquina:

8. ANÁLISIS EN CORTOCIRCUITO DE LA MÁQUINA.

8.1. Cálculo de la fuerza electromotriz en cortocircuito.

Para el cálculo de dicha fuerza se utilizará la misma ecuación que se utilizó para hacer el estudio en carga de la máquina, es decir, la ecuación 7.1. Pero como la salida de la máquina está cortocircuitada la tensión en

bornes es 0, quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$E = (R + Xj) \times I \quad (8.1)$$

Los valores son los utilizados en el apartado anterior, si se sustituye en la ecuación 8.1, se obtiene:

$$E = V$$

8.2. Cálculo de la corriente de excitación en cortocircuito.

Al igual que en el análisis en carga, se ha de tener en cuenta la reacción de inducido a la hora de calcular la corriente de excitación. Por tanto, se utilizará la misma ecuación en el apartado 7.2, es decir, la ecuación 7.3:

$$I_{exc/total} = I_o + I' \quad (8.2)$$

La corriente de vacío I_o se obtendrá de la curva de vacío, estando adelantada 90° de la fuerza electromotriz. Entrando con la fuerza electromotriz hallada en el apartado anterior se obtiene una corriente de excitación:

$$I_o = A$$

La reacción de inducido tendrá el mismo valor que en carga, ya que la corriente de carga es la misma, siendo, por tanto:

$$I' = A$$

Si se sustituye en la ecuación 8.2 se obtendrá la corriente de excitación total en cortocircuito:

$$I_{exc/total} = A$$

Como la característica de cortocircuito es una recta que comienza en el origen, ya se tienen dos puntos para construirla:

– Punto 1: (0 , 0)

– Punto 2: (348.99 ; 832.12)

A continuación se puede ver la característica de cortocircuito, en el capítulo de resumen de cálculos, capítulo 14.

9.CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA SÍNCRONA DE LA MÁQUINA.

Para el cálculo de este parámetro se pueden utilizar dos métodos distintos. Cada uno dará un valor distinto, tomándose el valor más alto por ser el más desfavorable.

–Método 1: para calcular la impedancia síncrona por este método se entra en la curva de vacío con la tensión nominal por fase y se obtiene la corriente de excitación para esa tensión. Con dicha corriente de excitación se entra en la característica de cortocircuito y se obtiene la intensidad de cortocircuito I_{cc1} . Con este último valor y la tensión por fase nominal se obtendrá la impedancia sincrónica, tal y como indica la siguiente ecuación:

$$(9.1)$$

A una tensión de 3637.31 voltios le corresponden una corriente de excitación de 228.35 A. y a esta corriente de excitación le corresponde una corriente de cortocircuito de 544.47 A, aproximadamente.

$$= 6.68 \text{ Ohm.}$$

– Método 2: en este método se entrará con la corriente de cortocircuito igual a la de carga en la característica de cortocircuito, obteniéndose una corriente de excitación que luego se utilizará para obtener una fuerza electromotriz. Con esta fuerza electromotriz y la corriente de carga se obtendrá la impedancia sincronía, tal y como se ve en la siguiente ecuación:

(9.2)

A una corriente de carga de 832.12 A le corresponde una corriente de excitación de 348.99 A., y a esta corriente de excitación le corresponde una fuerza electromotriz de 3950 voltios. Se sustituye todo esto en la ecuación 9.2 y se obtiene:

$$= 4.747 \text{ Ohm}$$

Como la impedancia sincronía obtenida mediante el primer método es mayor que la obtenida mediante el segundo método; se tomará como impedancia sincronía la del primer método:

$$Z_s = 6.680 \text{ Ohm}$$

– y a continuación se pasará esta impedancia a por unidad.

$$Z_s = 1.528 \text{ pu}$$

10. PESO DE LA MÁQUINA.

10.1. Peso del estator.

El peso del estator se puede dividir en dos partes, la corona y los dientes. Como para el cálculo del peso hay factores que son comunes como la longitud y el peso específico, se calculará el área y al final ya se multiplicará por esos factores.

En primer lugar se obtendrá el área de todo el estator, incluidas ranuras, y a continuación se le restará el área de todas las ranuras, para obtener el área de hierro útil. A continuación se dividirá dicho área en zona de dientes y corona.

$$A_{\text{total}} / \text{estator} = \pi/4 \times (D_{2\text{ext}}^2 - D_{2\text{int}}^2) \quad (10.1)$$

Los diámetros son datos: diámetro exterior del estator, dato 2.1, 1875 mm y diámetro interior del estator, dato 2.2, 1450 mm. Si se sustituye en la ecuación 10.1:

$$A_{\text{total}} / \text{estator} = \pi/4 \times (1875^2 - 1450^2) = 1109865.78 \text{ mm}^2$$

Ahora se procederá al cálculo del área de una ranura, utilizando la siguiente ecuación:

$$A_{\text{ranura}} = \quad (10.2)$$

Todos los elementos de la ecuación son datos dados:

- h: es la altura total (dato 3.2), 85 mm.
- B: es la anchura superior de la ranura (dato 3.1), 15 mm.
- hcuña : es la altura de la cuña (dato 3.4); 5 mm.
- acuña : es la anchura superior de cuña (3.3); 19 mm.

Aranura = mm² por ranura

Para obtener el área total de las ranuras habrá que multiplicar el área de una ranura por el número de ranuras del estator (dato 2.6), 144 ranuras. Por tanto, el área total será:

$$A_{\text{total}} / \text{ranura} = \text{Aranura} \times n^{\circ} \text{ de ranuras estator} = 1295 \times 144 = 186480 \text{ mm}^2$$

Si al área total se le resta el área de todas las ranuras se obtendrá el área del hierro, siendo este:

$$A_{\text{total de hierro}} = A_{\text{total}} / \text{estator} - A_{\text{total}} / \text{ranura} = 1109865.78 - 186480 = 923385.78 \text{ mm}^2$$

Ahora esta área hay que dividirlo en corona y dientes, por tanto, se hallará el área de la corona y una vez hallado este se le restará el área total del hierro y se obtendrá el área de los dientes.

$$A_{\text{corona}} = (10.3)$$

Los datos que aparecen en la ecuación 10.3 son todos conocidos. Los diámetros son los mismos datos utilizados para el cálculo del área total del estator y la altura de la corona se calculó en el apartado 6.5 a). Por tanto, si se sustituye en la ecuación 10.3 se obtendrá:

$$A_{\text{corona}} = 699966.48 \text{ mm}^2$$

Si ahora al área obtenido antes, el área total de hierro se le resta el área de la corona, se obtendrá el área de los dientes, como se indica a continuación:

$$A_{\text{dientes}} = A_{\text{total de hierro}} - A_{\text{corona}} = 923385.78 - 699966.48 = 223419.3 \text{ mm}^2$$

Una vez obtenidos las áreas, se multiplicarán estos por la longitud efectiva de hierro, pasando a las medidas más convenientes, y por el peso específico para obtener el peso en cada zona:

$$P = A \times L \times f_a \times (10.4)$$

Donde:

- L: es la longitud del hierro, dato 2.5; 1050 mm.
- f_a : es el factor de apilamiento, dato 2.10; 0.950.
- : es el peso específico del material magnético, dato obtenido en el Catálogo de chapa, bobina y fleje magnéticos de J.M.Aristrain SA, 7.7 kg/dm³

Si se sustituye en la ecuación 10.4 todos los datos se obtiene que la corona tiene un peso:

$$P = 699966.48 \times 10^{-4} \times 10.50 \times 0.95 \times 7.70 = 5376.27 \text{ Kg.}$$

Operando de la misma forma que con la corona se obtiene un peso para los dientes:

$$P = 223419.3 \times 10^{-4} \times 10.50 \times 0.95 \times 7.7 = 1716 \text{ Kg.}$$

10.2. Peso del rotor.

El cálculo del peso del rotor se realiza de igual manera que en el estator. En primer lugar se obtendrá el área de todo el rotor, incluidas ranuras tanto de excitación como de amortiguación, y a continuación se le restará el área de todas las ranuras, para obtener el área de hierro útil. A continuación se dividirá dicho área en zona de dientes y corona.

$$A_{\text{total}} / \text{rotor} = \pi/4 \times (D_{2\text{ext}}^2 - D_{2\text{int}}^2)_{\text{rotor}} \quad (10.5)$$

El diámetro exterior del rotor viene dado por la diferencia entre el diámetro interior del estator (dato 2.2) y dos veces el entrehierro (dato 2.3). El diámetro interior del rotor es dato, dato 2.4. Por tanto, si se sustituyen en la ecuación 10.5 se obtiene:

$$A_{\text{total}} / \text{rotor} = \pi/4 \times ((1450 - 2 \times 6)^2 - 1075^2) = 716455.13 \text{ mm}^2$$

Ahora se procederá al cálculo del área de una ranura de excitación, utilizando la siguiente ecuación:

$$A_{\text{ranura}} / \text{exc} = \quad (10.6)$$

Todos los elementos de la ecuación son datos dados:

- h: es la altura de la zona bobinada, es decir la altura total (dato 4.5) menos las alturas de la garganta (dato 4.2) y de la zona de estrangulamiento (dato 4.3).
- he : es la altura de la zona de estrangulamiento, dato (4.3).
- a: es la anchura de la ranura, dato (4.4).
- hg : es la altura de la garganta, dato (4.2).
- ag : es la anchura de la garganta, dato (4.1).

$$A_{\text{ranura}} / \text{exc} = 1930 \text{ mm}^2 \text{ por ranura e.}$$

A continuación se procederá al cálculo del área de una ranura de amortiguación, utilizando la siguiente ecuación:

$$A_{\text{ranura}} / \text{amorti} = (hg \times ag) + \quad (10.7)$$

Todos los elementos de la ecuación son datos dados:

- D: es el diámetro de la ranura, dato 5.3
- hg : es la altura de la garganta, dato 5.2
- ag : es la anchura de la garganta, dato 5.1

Sustituyendo en la ecuación 10.7, se obtiene:

$$\text{Aranura} / \text{amorti} = (2 \times 3) \times \pi = 92.59 \text{ mm}^2 \text{ por ranura a}$$

Para obtener el área total de las ranuras habrá que multiplicar el área de una ranura por el número de ranuras que haya. En el caso de las ranuras de excitación hay 10 ranuras bobinadas por polo (dato 7.5) y la máquina tiene 8 polos (calculado en el apartado 3), por tanto hay 80 ranuras practicadas. El número de ranuras que tiene el devanado de amortiguación sería de 120 (dato 2.7). Si luego se suman las dos áreas de cada ranura se obtendrá el área total de ranura:

$$\text{Atotal} / \text{ranuras exc.} = \text{Aranura} / \text{exc} \times \text{n}^\circ \text{ de ranuras} = 1930 \times 80 = 154400 \text{ mm}^2$$

$$\text{Atotal} / \text{ranuras amorti} = \text{Aranura} / \text{amorti} \times \text{n}^\circ \text{ de ranuras} = 92.59 \times 120 = 11110.8 \text{ mm}^2$$

La suma de estas áreas dará el área total de ranuras:

$$\text{Atotal} / \text{ranuras} = \text{Atotal} / \text{ranuras exc.} + \text{Atotal} / \text{ranuras amorti} = 154400 + 11110.8 = 165510.8 \text{ mm}^2$$

Si al área total se le resta el área de todas las ranuras se obtendrá el área de hierro, siendo este:

$$\text{Atotal de hierro} = \text{Atotal} / \text{rotor} - \text{Atotal} / \text{ranura} = 716455.13 - 165510.8 = 550944.33 \text{ mm}^2$$

Ahora esta área hay que dividirlo en corona y dientes, por tanto, se hallará el área de corona y una vez hallado este se le restará al área total de hierro y se obtendrá el área de los dientes.

$$\text{Acorona} = \left[\left(D_{\text{int}} + 2 \times h_{\text{corona}} \right)^2 \times \pi / 4 \right] - (10.8)$$

Los datos que aparecen en la ecuación 10.8 son todos conocidos. Los diámetros son los mismos datos utilizados para el cálculo del área total del rotor y la altura de la corona se calculó en el apartado 6.6 a). Por tanto, si se sustituye en la ecuación 10.8 se obtendrá:

$$\text{Acorona} = \left[\left(1075 + 2 \times 71.50 \right)^2 \times \pi / 4 \right] - = 257531.27 \text{ mm}^2$$

Si ahora al área obtenido antes, el área total de hierro se le resta el área de la corona, se obtendrá el área de los dientes, como se indica a continuación:

$$\text{Adientes} = \text{Atotal de hierro} - \text{Acorona} = 550944.33 - 257531.27 = 293413.06 \text{ mm}^2$$

Una vez obtenidos las áreas, se operará como en el estator, utilizando la siguiente ecuación:

$$P = A \times L \times f_a \times \gamma \quad (10.9)$$

Donde:

– L: es la longitud del hierro, dato 2.5; 1050 mm.

– f_a : es el factor de apilamiento, dato 2.10; 0.950.

– γ : es el peso específico del material magnético, dato obtenido en el Catálogo de chapa, bobina y fleje magnéticos de J.M.Aristrain SA, 7.81 kg/dm³

Si se sustituye en la ecuación 10.4 todos los datos se obtiene que la corona tiene un peso:

$$P = 257531.27 \times 10^{-4} \times 10.50 \times 0.95 \times 7.81 = 2006.29 \text{ Kg.}$$

Operando de la misma forma que con la corona se obtiene un peso para los dientes:

$$P = 293413.06 \times 10^{-4} \times 10.50 \times 0.95 \times 7.81 = 2285.83 \text{ Kg.}$$

10.3. Peso del hierro de la máquina.

Es posible obtener el valor del peso del hierro que dispone la máquina. Para ello hay que sumar los pesos obtenidos de los apartados anteriores:

$$P_{\text{total}} / \text{hierro} = P_{\text{ce}} + P_{\text{de}} + P_{\text{cr}} + P_{\text{dr}} = 2285.83 + 2006.29 + 1716 + 5376.3 = 11384.42 \text{ Kg}$$

10.4. Peso total de la máquina.

También es posible hallar el peso total aproximado de la máquina, si a este peso se le suma el de los devanados del estator y del rotor.

$$P_{\text{total}} = P_{\text{total}} / \text{hierro} + P_{\text{cue}} + P_{\text{cur}} = 11384.42 + 1548.10 + 1175.30 = 14107.82 \text{ Kg.}$$

11. PÉRDIDAS DE LA MÁQUINA.

Las pérdidas de una máquina se dividen entre las siguientes partes:

1. Pérdidas en el hierro de los dientes del estator.
2. Pérdidas en el hierro de la corona del estator.
3. Pérdidas en el cobre del devanado del estator.
4. Pérdidas en el cobre del devanado del rotor.
5. Pérdidas mecánicas.

11.1. Pérdidas en el hierro de los dientes del estator.

Las pérdidas en el hierro de los dientes del estator responden a la siguiente ecuación:

$$P_{\text{erde}} = P_{\text{de}} \times w/\text{kg} \quad (11.1)$$

Donde:

– P_{de} : es el peso de los dientes del estator, hallado en el apartado 10.1

– $w/\text{kg.}$: pérdidas en el hierro en vatios por kilogramo. Este dato se obtiene entrando en el Catálogo de chapa, bobina y fleje magnéticos con la inducción en los dientes del estator, sabiendo, además, que la calidad de la chapa es m – 1.7. Entonces:

$$B_{\text{de}} = 13537.11 \text{ Gauss} \quad w/\text{kg} = 3.00 \text{ w/kg}$$

Si se sustituye en la ecuación 11.1 se obtendrá las pérdidas en el hierro de los dientes del estator:

$$P_{\text{erde}} = 1716 \times 3.00 = 5148 \text{ w.}$$

La potencia de pérdidas obtenida es un valor teórico, para aproximarlos más al valor real, se multiplicará dicha potencia por un factor de aproximación (1.50).

$$\text{Perde reales} = 1.50 \times 5148 = 7722 \text{ w.}$$

11.2. Pérdidas en el hierro de la corona del estator.

Las pérdidas en el hierro de la corona del estator responden a la misma ecuación que la de los dientes, es decir, la ecuación 11.1. El peso también se halló en el apartado 10.1 y las pérdidas se obtendrán de las gráficas:

$$B_{ce} = 11625 \text{ Gauss ! } w/kg = 2.3 \text{ w/kg}$$

Si se sustituye en la ecuación 11.1 se obtendrá las pérdidas en el hierro de la corona del estator:

$$\text{Perce} = 5376 \times 2.30 = 12364.8 \text{ w.}$$

La potencia de pérdidas obtenida es un valor teórico, para aproximarlos más al valor real, se multiplicará por 1.50.

$$\text{Perce reales} = 1.50 \times 12364.8 = 18547.2 \text{ w.}$$

11.3. Pérdidas en el cobre del devanado del estator.

Estas pérdidas son debidas a la resistencia que ofrece el devanado al paso de la corriente eléctrica. Dicha corriente será la corriente de carga, que es la que circula por el devanado del estator. Y como la máquina dispone de 3 fases dichas pérdidas se multiplicarán por 3. Por tanto, las pérdidas en el cobre del devanado del estator responden a la siguiente ecuación:

$$\text{Potpcue} = q \times R_e \times I_c^2 \text{ (11.2)}$$

La intensidad de carga fue hallada en el apartado 7.1 y la resistencia del estator en el apartado 4.3. Si se sustituye en la ecuación 11.2 se obtendrá las pérdidas en el cobre del devanado del estator.

$$\text{Potpcue} = 3 \times 0.03225 \times 832.122 = 66992 \text{ w.}$$

11.4. Pérdidas en el cobre del devanado del rotor.

Al igual que las anteriores, estas pérdidas son debidas a la resistencia que ofrece el devanado al paso de la corriente. Dicha corriente será la corriente de excitación total. Por tanto, las pérdidas en el cobre del devanado del rotor responden a la siguiente ecuación:

$$\text{Potpcur} = R_r \times I_{exc}^2 \text{ (11.3)}$$

La intensidad fue hallada en el apartado 7.2 y la resistencia del rotor en el apartado 5.5. Si se sustituyen en la ecuación 11.3 se obtendrán las siguientes pérdidas:

$$\text{Potpcur} = 0.360 \times 643.162 = 148915.72 \text{ w}$$

11.5. Pérdidas mecánicas.

Como estas pérdidas son difíciles de medir, se supone un 1% de la potencia nominal. En estas pérdidas se

agrupan rozamientos, ventilación,

$$P_{mec} = 0.010 \times P_{nom} = 0.01 \times 6356000 = 63560 \text{ w}$$

11.6. Pérdidas totales de la máquina.

En este apartado se va a calcular la suma de todas las pérdidas.

$$P_{pérdidas \text{ totales}} = P_{perde \text{ reales}} + P_{perce \text{ reales}} + P_{otpcue} + P_{otpcue} + P_{mec} \quad (11.4)$$

Conocidos todos los datos, se obtiene:

$$P_{pérdidas \text{ totales}} = 7722 + 18547.2 + 66992 + 148915.72 + 63560 = 305736.92 \text{ w.}$$

11.7. Rendimiento de la máquina.

El rendimiento de una máquina responde a la siguiente ecuación:

$$= (11.5)$$

La potencia nominal de la máquina es dato 1.2 y la potencia de pérdidas es el dato calculado anteriormente. Por tanto, el rendimiento es:

$$= 0.9541 \text{ ! } 95.41 \%$$

12. CALENTAMIENTO DE LA MÁQUINA.

El calentamiento que se produce en los devanados de una máquina puede llegar a medirse mediante dos magnitudes: la capa de corriente y la densidad de corriente.

Dichas magnitudes multiplicadas dan otra magnitud que comparada con la práctica se puede obtener el calentamiento en cada uno de los devanados.

12.1. Calentamiento del devanado del estator.

Para el cálculo de la densidad de corriente se utilizará la siguiente ecuación:

$$(12.1)$$

Donde:

- I: es la intensidad de carga o línea, calculada en el apartado 7.1.
- Seqi : es la sección equivalente de conductor por la que pasa toda la intensidad de carga.

$$Seq = S \text{ de un conductor} \times n^{\circ} \text{ de ramas} = 44.8 \times 4 = 179.20 \text{ mm}^2$$

Si se sustituyen ambos valores se obtiene que la densidad de corriente es:

Para el cálculo de la capa de corriente se utilizará la siguiente ecuación:

$$(12.2)$$

Todas las magnitudes son conocidas a excepción de la intensidad de ranura, que se puede hallar de la siguiente forma:

(12.3)

La densidad de corriente es la que se acaba de calcular. El número de conductores por ranura es el dato 6.4. Y la sección de un conductor es la sección equivalente de la pletina que conforma el conductor, habiéndose calculado en el apartado 4.4. Si sustituimos en la ecuación 12.3 se obtendrá la intensidad de ranura:

A

Si se sustituye en la ecuación 12.2 todos los valores conocidos se obtiene que la capa de corriente es:

A / cm

Para obtener la magnitud antes mencionada solo habrá que multiplicar las magnitudes que se acaban de hallar:

Esta magnitud es adimensional.

Ahora esta magnitud teórica se comparará con la práctica (dato 9.1). Al Q práctico le corresponde un calentamiento de 100°C. Con una simple regla de tres se obtendrá el calentamiento en el devanado del estator de esta máquina.

(12.4)

Si se sustituye el Q práctico por su valor, se obtendrá un calentamiento:

Para ver la temperatura final, se sumará a la temperatura ambiente la variación de temperatura, quedando la temperatura final:

$T_{\text{final}} / \text{esta} = T_{\text{amb}} + T$ (12.5)

La temperatura ambiente es de 45°C (dato 1.11), entonces, si se sustituye en la ecuación 12.5 se obtendrá la temperatura final del devanado del estator:

$T_{\text{final}} / \text{esta} = 45 + 64.87 = 109.87^\circ \text{C}$

12.2. Calentamiento del devanado del rotor.

Para el cálculo de las dos magnitudes se utilizarán las mismas ecuaciones que se han utilizado para hacer el cálculo en el estator. Para hallar la densidad de corriente se utilizará la ecuación 12.1, la intensidad que se utilizará en este caso será la de excitación, hallada en el apartado 7.2 y la sección equivalente se puede ver a continuación:

$S_{\text{eq}} = S \text{ de un conductor} \times n^\circ \text{ de ramas} = 52.5 \times 2 = 105 \text{ mm}^2$

Si se sustituyen ambos valores se obtiene que la densidad de corriente es:

Para el cálculo de la capa de corriente se utilizará la ecuación 12.2. Donde, al igual que en el estator, la mayoría de las magnitudes son conocidas a excepción de la intensidad de ranura, que se halla con la ecuación 12.3. La densidad de corriente es la que se acaba de calcular. El número de conductores por ranura es dato 7.5. Y la sección de un conductor es la sección equivalente de la pletina que conforma el conductor, siendo este

calculado en el apartado 5.5. Si se sustituyen en la ecuación 12.3 se obtendrá la intensidad de ranura:

$$I_{\text{ranura}} = 52.5 \times 22 \times 6.125 = 7074.37 \text{ A}$$

Si se sustituye en la ecuación 12.2 todos los valores conocidos se obtiene que la capa de corriente es:

$$A / \text{cm}$$

Al igual que en el estator, si se multiplican ambas magnitudes se obtiene el Q teórico:

$$Q = Q_x = 1252.763 \times 6.125 = 7673.17$$

Se realiza la misma operación que en el devanado del estator y se obtiene el calentamiento mediante una regla de tres 12.4, saliendo en este caso el calentamiento:

Si se suma a la temperatura ambiente la variación de temperatura, como indica la ecuación 12.5, se obtendrá la temperatura final. Sabiendo que la temperatura ambiente es de 45°C , dato 1.11, se sustituye y se obtiene:

$$T_{\text{final}} / \text{rotor} = 45 + 207.38 = 252.38^\circ \text{C}$$

Como se puede observar el calentamiento es excesivo, sobrepasando el límite impuesto por el tipo de aislamiento. En este caso convendría repasar los cálculos y en caso de que fueran coherentes rediseñar la máquina.

13. MOMENTO DE INERCIA DE LA MÁQUINA.

El momento de inercia es una magnitud que expresa la oposición que ofrece el rotor a la variación de velocidad. Para calcular dicha magnitud se atenderá a la siguiente ecuación:

(13.1)

Donde:

– M : es el peso del rotor, incluyendo corona, dientes cobre, datos calculados en los apartados 10.2 los dos primeros y en el apartado 5.11 el peso del cobre:

$$M = P_{\text{cr}} + P_{\text{dr}} + P_{\text{cur}} = 2006.29 + 2285.83 + 1548.10 = 5840.24 \text{ Kg}$$

– r : es el radio de giro del rotor, siendo este el radio interior del estator (dato 2.2) menos la parte correspondiente al entrehierro (dato 2.3), debiendo estar en metros para que las unidades sean coherentes:

$$r = \text{mm} = 0.719 \text{ m}$$

Por tanto, si se sustituye en la ecuación 13.1, se obtendrá el momento de inercia:

$$\text{kg m}^2$$

También es posible hallar la velocidad tangencial del eje, ya que se sabe que la velocidad es 750 rpm (dato 1.6). Para ello se debe pasar esta velocidad a revoluciones por segundo:

$$750 \text{ rpm} \times 1/60 = 12.5 \text{ rps}$$

Si esta velocidad se multiplica por la circunferencia, se obtendrá la velocidad en metros por segundo:

$$V_{\text{tang}} = 12.5 \times 2 \times 0.719 = 56.47 \text{ m/s} = 203.292 \text{ Km/h}$$

14. RESUMÉN DE CÁLCULOS Y TABLAS

Características del devanado del estator.

Número de espiras por fase y rama: 60

Factor de devanado 0.9235

Longitud de cabeza de bobina 644.86 mm

Saliente total de cabeza de bobina 282.17 mm

Longitud de conductor medio 2046.86 mm

Ángulo de cabeza de bobina 38.83°

Resistencia por fase en Ohmios 0.03225

Resistencia por fase en por unidad 0.00738

Permeanza de ranura 1.9494

Permeanza de dientes 0.3030

Permeanza de cabeza de bobina 1.25002

Reactancia por fase en ohmios 0.5152

Reactancia por fase en por unidad 0.1179

Peso del devanado 1175.30 Kg

Características del devanado del rotor.

Número de espiras por rama y polo 55

Factor de devanado 0.8285

Longitud de cabeza de bobinado 480.5 mm

Longitud de conductor medio 1882.5 mm

Resistencia total del devanado 0.360 Ohm

Resistencia total del devanado ref. a estator 0.02016 Ohm

Resistencia total del devanado ref. estator 0.004612 p.u.

Permeanza de ranura 2.5947

Permeanza de zig-zag 0.4690

Permeanza de cabeza de bobina 1.4815

Reactancia por fase 21.57 Ohm

Reactancia por fase ref. al estator 1.2079 Ohm

Reactancia por fase ref. al estator 0.276 pu

Peso del cobre 1548.10 Kg.

Análisis en vacío.

Inducción en el entrehierro 7119 G

Fuerza magnetomotriz en el entrehierro 4074.77 Av

Inducción en dientes del estator 13537.21 G

Fuerza magnetomotriz en dientes del estator 46.07 Av

Inducción en dientes del rotor 14474 G

Fuerza magnetomotriz en dientes del rotor 49.194 Av

Inducción en corona del estator 11625.164 G

Fuerza magnetomotriz en corona del estator 71.266 Av

Inducción en corona del rotor 20720 G

Fuerza magnetomotriz en la corona del rotor 6164.18 Av

Corriente de excitación en vacío 228.35 A

Reactancia de magnetización 15.93 Ohm.

Análisis en carga.

Fuerza electromotriz en carga 3972.18 v

Corriente de excitación en carga 643.16 A

Análisis en cortocircuito

Fuerza electromotriz en cortocircuito 429.55 v

Corriente de excitación en cortocircuito 348.99 A

Cálculo de la impedancia sincrónica.

Impedancia sincrónica 6.680 Ohm

Impedancia sincrónica en por unidad 1.528 pu

Peso de la máquina.

Peso de los dientes del estator 1716 Kg

Peso de la corona del estator 5376.27 Kg

Peso de los dientes del rotor 2285.83 Kg

Peso de la corona del rotor 2006.29 Kg

Peso del hierro de la máquina 11384.42 Kg

Peso total de la máquina 14107.82 Kg

Pérdidas y rendimiento de la máquina.

Pérdidas en los dientes del estator 7722 w

Pérdidas en la corona del estator 18547.20 w

Pérdidas en el cobre del devanado del estator 66992 w

Pérdidas en el cobre del devanado del rotor 148915.72 w

Pérdidas mecánicas 63560 w

Rendimiento de la máquina 95.41 %

Calentamiento de la máquina.

Densidad de corriente en el estator 4.64 A / mm²

Capa de corriente del estator 657.11 A / cm

Factor Q del estator 3048.99

Incremento de temperatura del estator 64.87° C

Temperatura final del estator 109.87° C

Densidad de corriente en el rotor 6.125 A / mm²

Capa de corriente del rotor 1252.763 A / cm

Factor Q del rotor 7673.17

Incremento de temperatura del rotor 207.38° C

Temperatura final del rotor 252.38° C

Momento de inercia.

Momento de inercia 1509.59 Kg m²

Velocidad tangencial 203.29 Km / H

15. CONCLUSIONES.

Sin duda los capítulos dedicados a partir de la análisis en vacío, resulta más interesante; ya que a partir de estos capítulos es cuando se realiza en sí el estudio general de la máquina (determinación de rendimientos, pesos, momentos de inercia); no sin despreciar a los capítulos anteriores.

A partir de ahí, podemos determinar conceptos tan chocantes, como el rendimiento; viendo como siempre en las máquinas eléctricas se cumple el Segundo Principio de la Termodinámica, es decir que el rendimiento no va a ser de un 100%.

Además las máquinas eléctricas son máquinas que poseen un rendimiento muy alto; en comparación con otro tipo de máquinas.

También podemos ver, como en el tema de parámetros térmicos, cuando se pone una máquina en funcionamiento, siempre la máquina se tiende a calentar. Habrá que tener mucho cuidado con este tema, debido al gran calentamiento que resulta en el rotor; pudiendo para ello, rediseñar la máquina; o bien utilizar algún sistema de evacuación de calor; utilización de ventiladores, utilización de algún sistema de refrigeración

Por otro lado, hay que darse cuenta que con esta carpeta podemos imaginarnos una aproximación real a nuestra máquina, pudiendo obtener otros tipo de conclusiones.

16. BIBLIOGRAFÍA

Para el estudio y cálculo de esta máquina se han utilizado los siguientes libros:

JUAN CORRALES MARTÍN. *Cálculo Industrial de máquinas eléctricas* TOMO I. Ed. Marcombo–Boixareu. Barcelona 1987. 690 pág.

JOSÉ MARÍA ARISTRAIN SA. *Catálogo de chapa, bobina y fleje magnéticos* , 75 pág.

JOSÉ YOLDI IRIBARREN, VICENTE MORENO BAÑEZA. *Apuntes de máquinas eléctricas, máquinas síncronas* TOMO II. U.P.V., San Sebastián 1992, 219 pág.

Apuntes de la asignatura de Oficina Técnica, de la especialidad de máquinas eléctricas del curso 1999 – 2000.