

870117

5

2ej

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE GUADALAJARA

INCORPORADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



FALLA DE ORIGEN

PROYECTO PARA LA CONSTRUCCION DE UN SISTEMA PARA
PROBAR EL FUNCIONAMIENTO CON CARGA, MOTORES Y
GENERADORES DE CORRIENTE DIRECTA DE ALTA POTENCIA

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A

JOSE GUILLERMO LOMELI BEHERENDT

GUADALAJARA, JAL.

1992

1995



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A MIS PADRES.

A MI ESPOSA E HIJOS.

A MIS HERMANOS.



ESCUELA DE INGENIERIA.

Guadalajara, Jal., 2 de Abril de 1982.

Al Pasante de
Ingeniero Mecánico Electricista
Area: Sistemas Electricos y Electronicos
Sr. José Guillermo Lomeli Beherend
P r e s e n t e.

En contestación a su solicitud de fecha 1 de Marzo del presente año, me es grato informarle que la Comisión de Tesis que me honro en presidir, aprobó como tema que Usted deberá desarrollar para su examen de Ingeniero Mecánico Electricista, el que a continuación transcribo:

" PROYECTO PARA LA CONSTRUCCION DE UN SISTEMA PARA PROBAR EL FUNCIONAMIENTO - CON CARGA, MOTORES Y GENERADORES DE CORRIENTE DIRECTA DE ALTA POTENCIA. "

INTRODUCCION.

- I.- FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.
- II.- CALCULO DE LOS ELEMENTOS.
- III.- CIRCUITO EQUIVALENTE.
- IV.- CARACTERISTICAS DE MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA CON CARGA.
- V.- CARACTERISTICAS DE GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA CON -- CARGA.
- VI.- PRUEBA DE MOTORES A CARGA PLENA.
- VII.- PRUEBA DE GENERADORES.
- VIII.- CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFIA.

Ruego a Usted tomar nota que la copia fotografiada del presente oficio, deberá ser incluido en los preliminares de todo ejemplar de sus Tesis.

ATENTAMENTE,
" CIENCIA Y LIBERTAD "

Ing. Luis Jorge Aguilera Castillas
DIRECTOR, ESC. DE INGENIERIA DE GUADALAJARA
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA
AV. PATRIA 1201 - LOMAS DEL VALLE - 3a. SECCION - APARTADO POSTAL 1-440
DIRECCION CABLEGRAFICA, UAO GUADALAJARA - GUADALAJARA, JALISCO, MEXICO

I N T R O D U C C I O N

En la reconstrucción de máquinas de corriente directa, las pruebas necesarias que se deben realizar son: pruebas secuenciales y pruebas finales.

Dentro de las pruebas secuenciales tenemos las pruebas dieléctricas y las pruebas de resistencia óhmica. Las pruebas dieléctricas se realizan conforme la reconstrucción de la máquina avanza y se efectúan entre las delgas ó barras que forman el conmutador, entre las láminas -- que forman el circuito magnético del inducido, entre los conductores que forman el circuito eléctrico y entre el circuito eléctrico y masa ó tierra, determinando el buen ó mal estado de las micas, el barniz, el esmalte y las cintas aislantes y aislantes en general (anillos de mica, pieza U, etc.), respectivamente, hasta finalizar la reconstrucción.

Las pruebas de resistencia óhmica se realizan, en el inducido, entre delga y delga, determinando el buen ó mal estado de los conductores y de las uniones mediante soldadura entre la delga y el conductor; en el inductor, se realizan en los campos principales (serie y/ó derivado) y en los campos auxiliares (interpolos y/ó de compensación), determinando el buen ó mal estado de los conductores y de las uniones en puentes y cables de salida.

Las pruebas finales se realizan cuando la máquina está en funcionamiento, ya que estará sometida a diferentes fuerzas, tanto mecánicas como magnéticas.

De las pruebas finales se obtienen las magnitudes necesarias para determinar los parámetros de funcionamiento.

El objetivo de la construcción de éste sistema es poder realizar las pruebas finales y obtener las magnitudes necesarias, simulando las condiciones normales de trabajo de la máquina, llevandola a su velocidad de rotación, voltaje y corriente nominales, para poder determinar sus parámetros de funcionamiento.

I FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

1.1 ELEMENTOS DEL SISTEMA.

Los elementos que formarán el sistema son:

- a) 1 Generador principal.
- b) 1 Motor impulsor.
- c) 1 Generador auxiliar.
- d) 1 Generador como carga.
- e) 2 Fuentes de excitación.
- f) 1 Arrancador.
- g) 9 Contactores.
- h) 1 Banco de resistencias.
- i) 3 Reostatos.
- j) 1 Tacómetro generador.
- k) 2 Termómetros.
- l) 5 Amperímetros de corriente directa.
- m) 6 Voltímetros de corriente directa.

Las especificaciones de cada uno de los elementos, se verán con mayor detalle en el capítulo II.

1.2 PRUEBA DE GENERADORES.

El motor impulsor se acoplará al generador a probar mediante bandas, para que la velocidad de rotación del generador sea siempre la nominal.

Esto se logrará colocando poleas al motor impulsor y al generador a probar, que nos den la relación necesaria, esto es:

sean: RPM_1 = Velocidad de rotación del motor impulsor.
 RPM_2 = Velocidad de rotación del generador a probar.
 r_1 = Radio de polea en el motor impulsor.
 r_2 = Radio de polea en el generador a probar.

entonces, la velocidad tangencial para cada polea será:

$$\vec{V}_1 = (RPM_1)r_1 \quad \text{y} \quad \vec{V}_2 = (RPM_2)r_2$$

como la velocidad tangencial de la polea del motor es igual a la velocidad tangencial de la polea del generador, tenemos que:

$$(RPM_1)r_1 = (RPM_2)r_2 \quad (1.1)$$

De aquí encontramos que el radio de polea necesario para el generador es:

$$r_2 = \frac{(RPM_1)r_1}{(RPM_2)} \quad (1.2)$$

La prueba de generadores se hará solo a tres tipos: excitación separada, autoexcitada y excitación compuesta.

En todos los casos, el voltaje generado y/o la corriente de inducido se regularán por medio de la fuente de excitación y/o por el banco de resistencias respectivamente, siendo estos dos elementos, los más importantes en el control del generador durante la prueba.

Manteniendo la velocidad de rotación nominal constante, las características que se podrán trazar en función de las magnitudes del generador son:

- i) Característica en vacío. $V = f(i_{exc})$, para $I_a = 0$.
- ii) Característica en carga. $V = f(i_{exc})$, para $I_a = \text{constante}$.
- iii) Característica exterior. $V = f(I_a)$, para $R_{exc} = \text{constante}$.
- iv) Característica de regulación. $I_a = f(i_{exc})$, para $V = \text{constante}$.
- v) Característica en corto circuito. $I_a = f(i_{exc})$, para $V = 0$.

En la fig.-1.1 tenemos el circuito de prueba de un generador de excitación separada, en donde podemos observar al motor acoplado al generador a probar, que tiene a su vez como carga al banco de resistencias.

La fuente de excitación tiene dos pares de contactos (CR1 y CR2) a la entrada del autotransformador; los contactos CR1 son normalmente cerrados y abrirán a un voltaje determinado por su bobina CR1, conectada a través de un reostato, en paralelo con la salida del generador; ésto es con el fin de evitar sobrevoltajes en el inducido del generador al quedar sin carga, lo cual podría dañar a los conductores del devanado ó incluso al conmutador.

Los contactos CR2 son normalmente abiertos y actuarán cuando un switch límite (SW₁), colocado en el autotransformador de la fuente, se encuentre en la posición de cero volts de salida, evitando iniciar la prueba del generador con voltaje en su campo de excitación.

1.3 PRUEBA DE MOTORES

El motor impulsor se acoplará mecánicamente al generador principal, el cual proporcionará la energía para alimentar al motor a probar. El generador principal moverá a su vez a un generador auxiliar de tipo autoexcitado, el cual alimentará al campo de excitación del generador principal.

El motor a probar se acoplará mecánicamente a un generador que servirá como carga, conectando su salida al banco de resistencias.

Un tacómetro generador acoplado a la flecha del motor, servirá para indicar la velocidad de rotación y al mismo tiempo como protección para el motor bajo prueba.

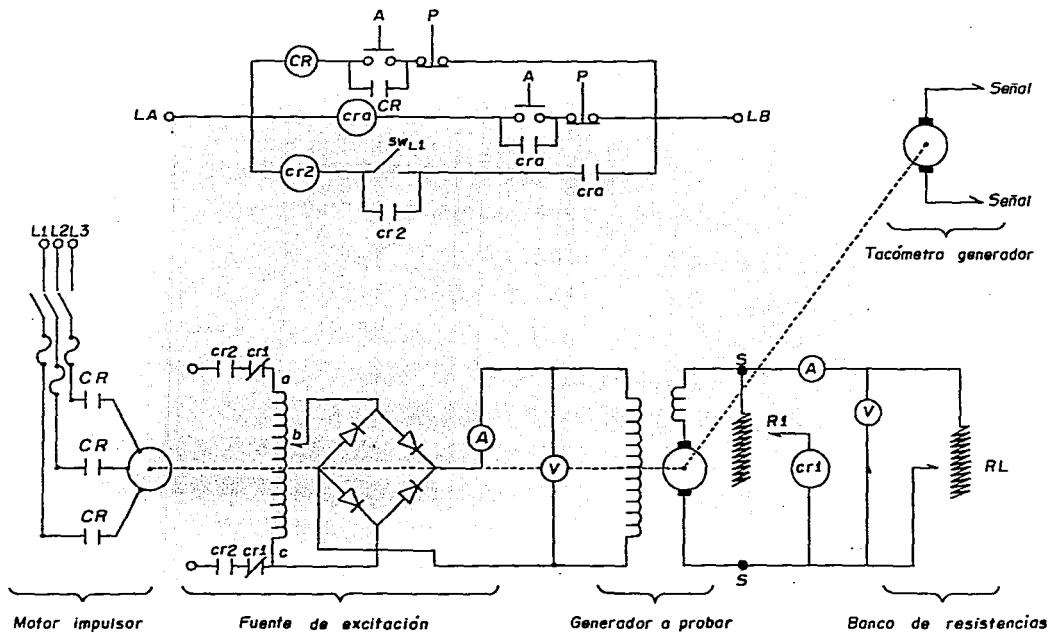


Fig.- 1.1 circuito de prueba para un generador de excitación separada.

Un motor serie, al quedar sin carga, aumentará su velocidad de rotación sin control hasta el embalamiento, aumentando también el voltaje en el inducido del generador principal considerablemente; si la falla ocurre entre el banco de resistencias y el generador usado como carga, entonces también existirá un sobrevoltaje en el inducido de éste generador, por lo que para evitar llegar a valores críticos, tanto de velocidad de rotación (motor serie), como de sobrevoltajes (generadores), se colocarán tres contactores de la siguiente manera (ver fig.-1.2) :

- i) a la salida del tacómetro generador (CR3).
- ii) a la salida del generador principal (CR4).
- iii) a la salida del generador como carga (CR5).

Las bobinas estarán conectadas a través de un reostato calibrado previamente para actuar a una velocidad de rotación ó a un voltaje máximo determinado. Estas bobinas abrirán los contactos CR3, CR4 ó CR5, dejando sin alimentación al campo de excitación del generador principal. En caso de que la falla ocurriera en el acoplamiento mecánico del motor en prueba, el contacto CR5 no abrirá.

Tanto en el reostato del campo del generador auxiliar, como en el autotransformador de la fuente de excitación, habrá un switch límite; el primero colocado en el máximo valor de resistencia (SW_{L2}) y el segundo colocado a cero volts de salida (SW_{L1}) (ver fig.-1.2)

Un motor de excitación separada ó de excitación shunt, al quedar sin excitación, causará los mismos problemas que un motor serie al quedar sin carga, con lo que los contactores CR3, CR4 ó CR5 actuarán como ya mencionamos; la única variación respecto al circuito de prueba de un motor serie, será una nueva fuente de excitación para el campo del motor, con dos contactos CR8 que cerrarán a un voltaje calibrador previamente, el cual será el nominal de excitación (ver fig.-1.3); un contacto normalmente abierto CR8 intercalado en serie con la bobina CR6, evitará alimentar ó poner en marcha al motor a probar sin tener su campo excitado.

Para probar motores de excitación compuesta, se usará el mismo circuito que para motores de excitación separada ó excitación shunt.

Las características que se podrán obtener en función de sus magnitudes son:

- i) Característica exterior ó de velocidad. $S = f(I_a)$.
- ii) Característica de momento ó par. $M = f(I_a)$.
- iii) Rendimiento $\eta = f(I_a)$.

En todas las pruebas, tanto para generadores, como para motores, se colocarán dos termómetros, uno en cada caja de rodamientos y se tomará lectura cada 15 minutos, durante 2 horas, chequeando así el buen ó mal estado de los rodamientos. Estas lecturas se tomarán girando la máquina en vacío y manteniendo su velocidad de rotación constante.

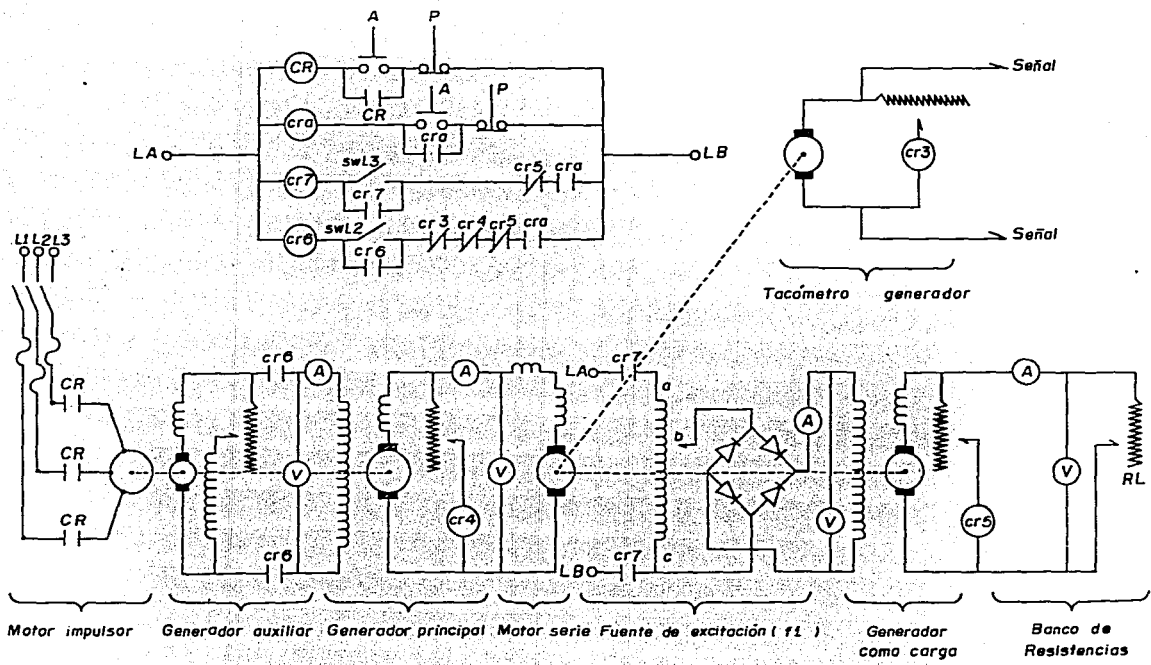


Fig.-1:2 Circuito de prueba para un motor serie.

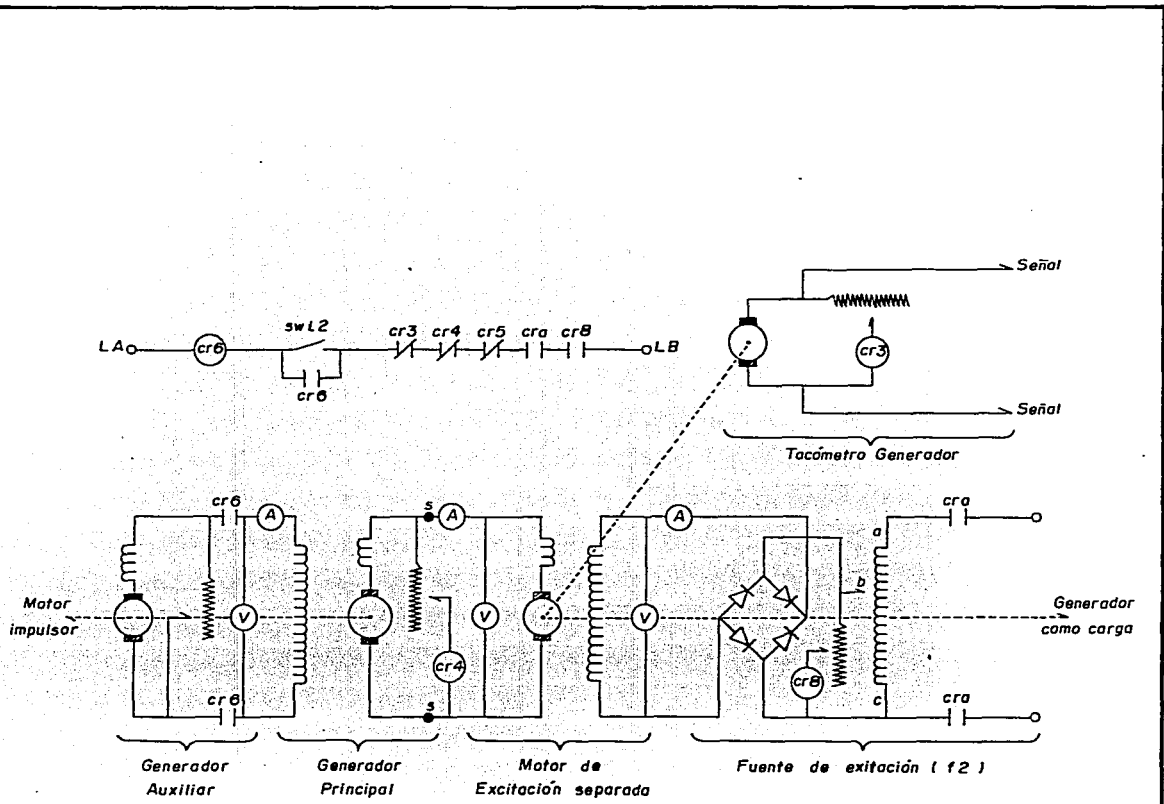


Fig-1.3 Parte del circuito de prueba para un motor de excitación separada ó excitación shunt mostrando la diferencia respecto del circuito para prueba de un motor serie.

II CALCULO DE LOS ELEMENTOS

2.1 GENERADOR PRINCIPAL.

Como generador principal utilizaremos un modelo 581 de excitación separada; sus datos generales son:

Modelo GT-581 A1 General Electric.

- 1,600 H.P.
- 600 volts.
- 2,300 amperes.
- 900 RPM
- Sentido de rotación: CCW (visto del lado del conmutador).

| Resistencias a 25°C y a 50°C (ohms) | 25°C | 50°C |
|-------------------------------------|---------|---------|
| - Campo de excitación | 1.750 | 1.918 |
| - Interpolos | 0.00148 | 0.00162 |
| - Campo de arranque | 0.00155 | 0.00167 |
| - Inducido | 0.00313 | 0.00343 |

Datos sobre escobillas.

- Longitud mínima 1 3/16"
- Dimensiones 3/4"X1 1/4"X2 1/2"
- Presión 50 a 60 onzas
- Claro entre portaescobillas y conmutador 3/32" a 1/8"

Datos sobre conmutador

- Diámetro en pista nuevo 23 3/4"
- Diámetro en pista mínimo 23"
- Profundidad de ranurado 5/64"

La característica en vacío del generador 581 se muestra en la fig.-2.1 y el diagrama en la fig.-2.2.

La excitación del generador GT-581 se realiza por medio de un generador auxiliar, el cual va montado en el propio generador 581. Este generador es de tipo autoexcitado, por lo que variando la resistencia de su campo de excitación, regularemos la corriente de excitación del generador 581 (ver figs.-1.2 y 1.3).

Los datos generales del generador auxiliar son:

Modelo GY-27 A1 General Electric.

- 12 - 51 KW.
- 75 - 250 volts.
- 160 - 240 amperes.
- 850 - 2400 RPM
- Sentido de rotación: CW (visto del lado del conmutador).

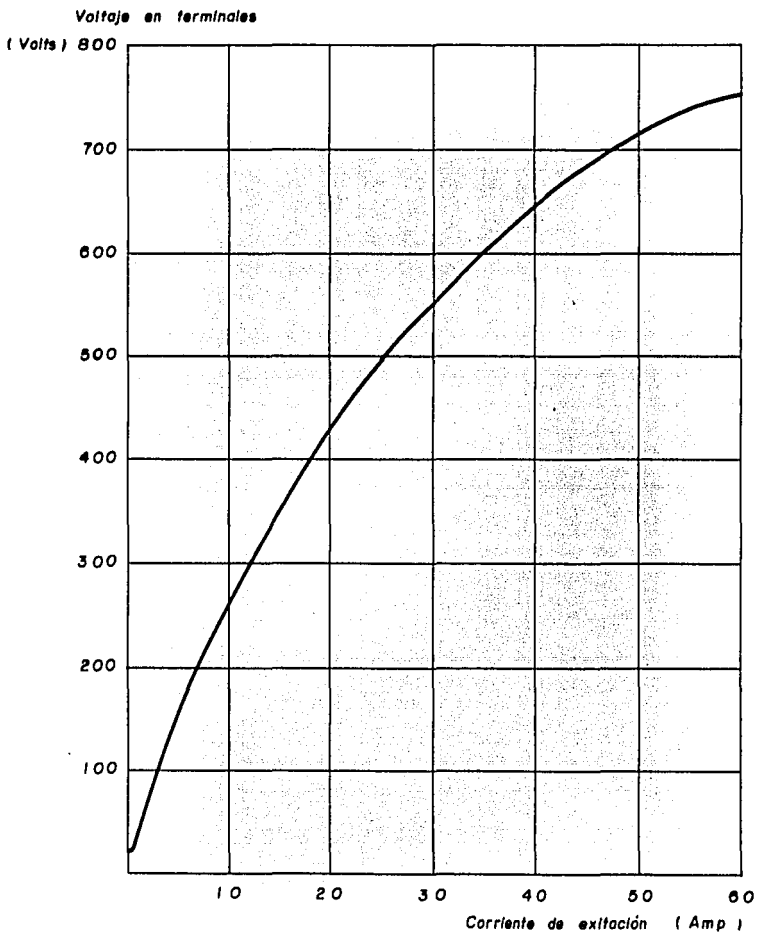


Fig.-2.1 Característica en vacío del generador principal 581. a 835 RPM.

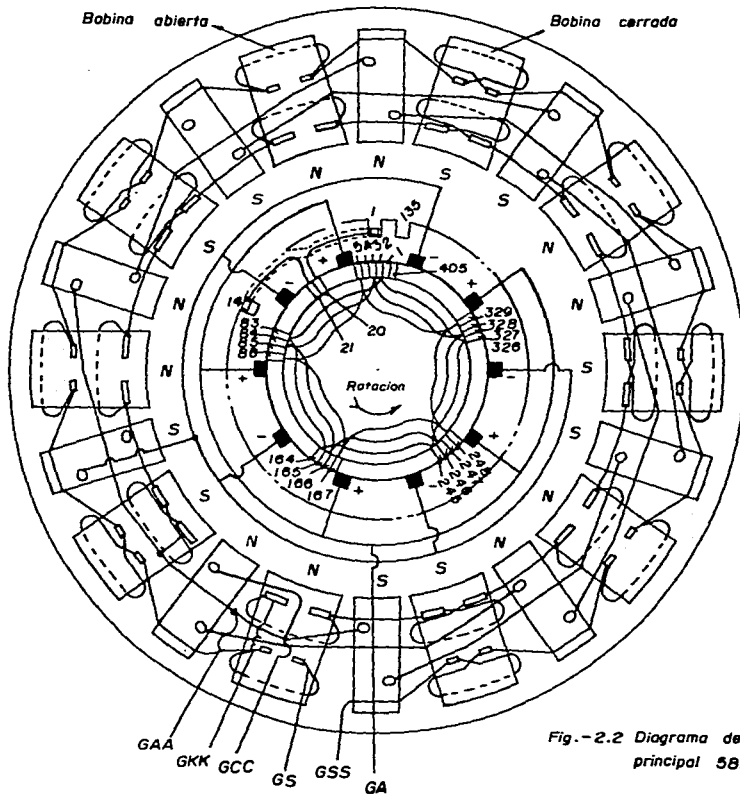


Fig.-2.2 Diagrama del generador principal 581.

| Resistencia a 25°C y a 50°C (ohms) | 25°C | 50°C |
|------------------------------------|--------|--------|
| - Campo de excitación | 9.15 | 10.03 |
| - Interpolos | 0.0107 | 0.0117 |
| - Inducido | 0.024 | 0.0263 |

Datos sobre escobillas

| | |
|--|----------------|
| - Longitud mínima | 15/16" |
| - Dimensiones | 1/2"X1"X1 3/4" |
| - Presión | 43 a 53 onzas. |
| - Claro entre portaescobillas y conmutador | 1/16" a 3/32" |

Datos sobre conmutador

| | |
|----------------------------|--------|
| - Diámetro en pista nuevo | 8" |
| - Diámetro en pista mínimo | 7 1/2" |
| - Profundidad de ranurado | 3/64" |

El diagrama del generador auxiliar se muestra en la fig.-2.3 .

2.2 MOTOR IMPULSOR

Para calcular la potencia del motor, tomaremos la potencia base del sistema, más las pérdidas de los generadores principal y auxiliar.

1) Potencia base del sistema: $P_b = 600 \text{ KW}$

ii) Pérdidas en el generador principal.

a) Pérdidas en el cobre (P_{cob}) a 50°C

$$P_{cob} = I_a^2 R_a = (1,090)^2 (0.00162 + 0.00343) = 6 \text{ KW}$$

b) Pérdidas en el campo de excitación (P_{exc}) a 50°C

$$P_{exc} = (I_{exc})^2 R_{exc} = (50)^2 (1.918) = 4.8 \text{ KW}$$

c) Pérdidas por contacto de escobillas (P_e)

$$P_e = 2V_e I_a = 2(1)(1,090) = 2.18 \text{ KW}$$

d) Pérdidas mecánicas (P_{mec}), pérdidas por corrientes parásitas (P_{par}), pérdidas por histéresis (P_h) y pérdidas adicionales (P_{ad}).

Estas pérdidas las calcularemos por medio de la eficiencia del generador, que a 600 KW de salida es de 0.91, con lo que:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{cob} + P_e + P_m + P_{par} + P_h + P_{ad} + P_{exc}} = 0.91$$

$$P_m + P_{par} + P_h + P_{ad} = \frac{P_2}{\eta} - (P_2 + P_{cob} + P_{exc} + P_e)$$

$$= 600/0.91 - (600 + 6.0 + 4.8 + 2.18) = 46.36 \text{ KW}$$

Total de pérdidas = 6.0 + 4.8 + 2.18 + 46.36 = 59.34 KW

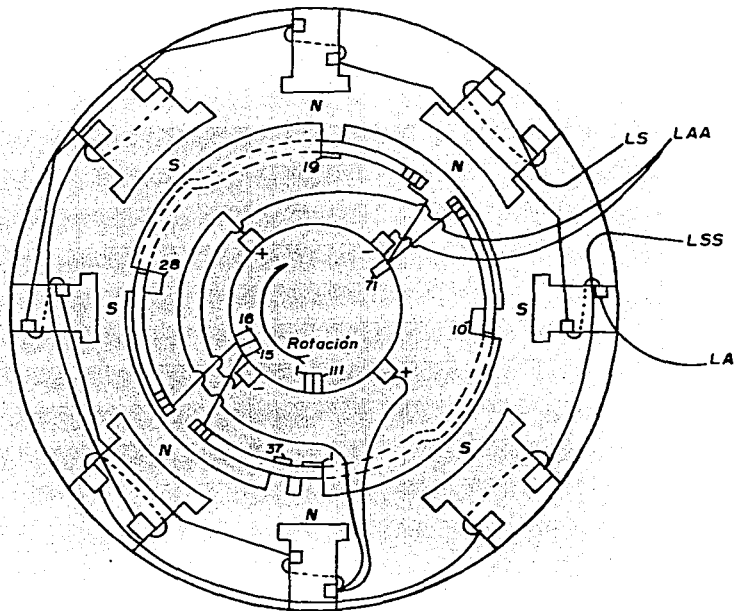


Fig.- 2.3 Diagrama del generador auxiliar GY- 27

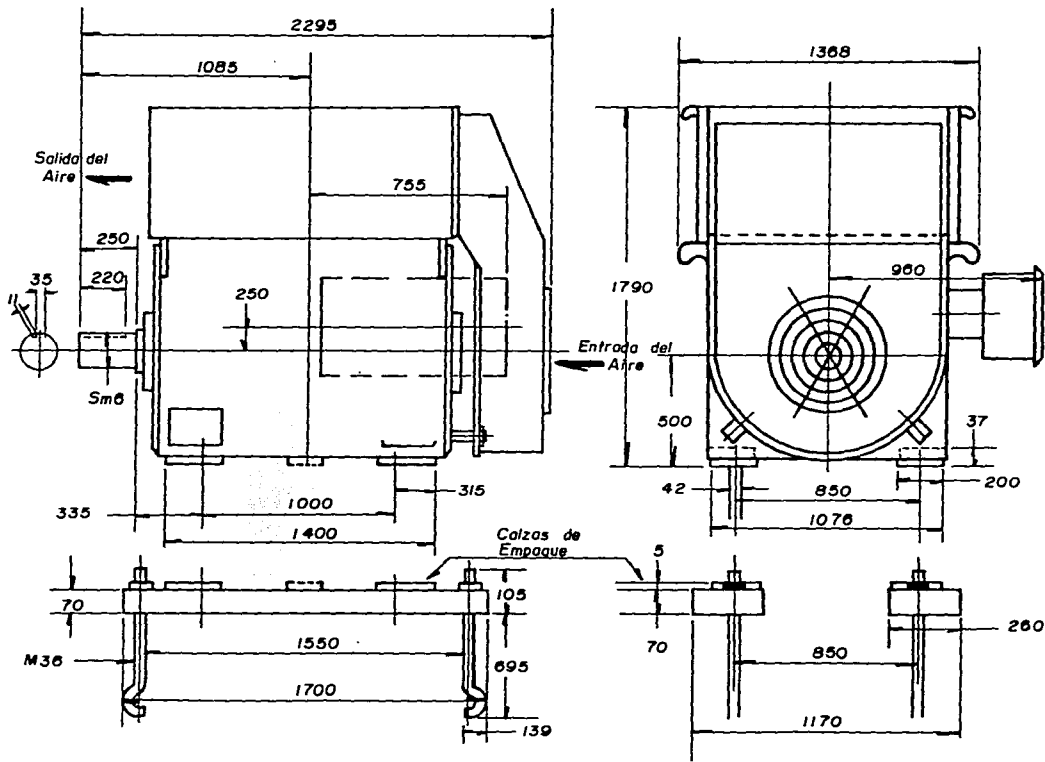


Fig-2.4 Motor Principal (Medidas en milímetros)

iii) Pérdidas en el generador auxiliar.

a) Pérdidas en el cobre (P_{cob}) a 50°C

$$P_{cob} = (50)^2(0.0117 + 0.0262) = 0.095 \text{ KW}$$

b) Pérdidas en el campo de excitación (P_{exc})

$$P_{exc} = (3.2)^2(10.03) = 0.102 \text{ KW}$$

c) Pérdidas por contacto de escobillas (P_e)

$$P_e = 2(1)(50) = 0.1 \text{ KW}$$

d) Pérdidas mecánicas (P_{mec}), pérdidas por corrientes parásitas (P_{par}), pérdidas por histéresis (P_h) y pérdidas adicionales (P_{ad}).

Como en el caso anterior, éstas pérdidas las obtendremos por medio de su eficiencia, que para la potencia de 4.9 KW es de aproximadamente 0.85, con lo que:

$$P_m + P_{par} + P_h + P_{ad} = 4.8/0.85 - (4.8 + 0.095 + 0.103 + 0.1) \\ = 5.647 - 5.098 = 0.549 \text{ KW}$$

$$\text{Total de pérdidas} = 0.095 + 0.103 + 0.1 + 0.549 = 0.846 \text{ KW}$$

Sumando la potencia a entregar por el generador principal a las pérdidas de los generadores, obtendremos la potencia mínima que deberá tener el motor impulsor, la cual es:

$$P_{mot} = 600 + 59.34 + 0.846 = 660.2 \text{ KW}$$

Como la transmisión para probar generadores se hará por medio de bandas, debemos de considerar un 3% de pérdidas, con lo que la potencia del motor debe ser:

$$P_{mot} = 660.2(1.03) = 680 \text{ KW} = 911 \text{ H.P.}$$

Si utilizamos un motor de 1,000 H.P., podremos tener una tolerancia de un 10% aproximadamente mayor.

iv) Par de arranque del motor.

El generador 581 está formado en su inducido, por dos cilindros anulares; el conmutador y la laminación devanada; los diámetros y pesos de cada uno son los siguientes:

a) Conmutador

- Diámetro exterior (D_1) = 0.603 mts.
- Diámetro interior (D_2) = 0.391 mts.
- Peso del conmutador (N) = 436.3 Kg.

b) Laminación devanada

- Diámetro exterior (D_1) = 1.092 mts.
- Diámetro interior (D_2) = 0.762 mts
- Peso de laminación devanada (N) = 1,396.2 Kg.

Partiendo de la ecuación de la inercia de rotación para un cilindro anular, tenemos:

$$GD^2 = \frac{1}{2}M(D_1^2 + D_2^2) \text{ en Kg-mt}^2 \quad (2.1)$$

con lo que para el conmutador es:

$$GD^2 = \frac{1}{2}(436.2)[(0.603)^2 + (0.391)^2] = 112.67 \text{ Kg-mts}^2$$

y para la laminación devanada es:

$$GD^2 = \frac{1}{2}(1,396.2)[(1.092)^2 + (0.762)^2] = 1,237.8 \text{ Kg-mts}^2$$

La inercia de rotación total del inducido es:

$$GD^2 = 112.67 + 1,237.8 = 1,350.47 \text{ Kg-mts}^2$$

Considerando la inercia de rotación del generador auxiliar en un 5% de la inercia de rotación del generador principal, entonces la inercia total de los generadores será:

$$GD^2 = 1,350.47(1.05) = 1,418 \text{ Kg-mts}^2$$

y en Lbs-pic² (Wk) será: $Wk^2 = GD^2/0.169$ (2.2)

en donde $Wk^2 = 1,418/0.169 = 8,390 \text{ Lbs-pic}^2$

El valor GD^2 permisible para un motor jaula de ardilla de 1,000 H.P. a 8 polos es de:

$$3,255 \text{ Kg-mts}^2 = 19,260 \text{ Lbs-pic}^2$$

Los datos generales del motor son:

Megatek-Hitachi
 tipo TP 450E (ver fig.-2.4)
 1,000 H.P.
 2,300 volts
 215 amperes
 835 RPM

2.3 GENERADOR COMO CARGA

El generador como carga será de 600 KW a 600 volts, con una eficiencia de 91.6%, con lo que la potencia de prueba para los motores será de 655 KW aproximadamente.

Los datos generales del generador son:

Modelo GE-752 A6 General Electric

- 600 KW
- 600 Volts
- 1,090 amperes
- 1,200 RPM
- Excitación: 600 volts, 8.66 - 7.2 amperes
- Rotación: CCW (visto del lado del conmutador)

Resistencia a 25°C y a 75°C (ohms)

| | | |
|-----------------------|---------|----------|
| | 25°C | 75°C |
| - Campo de excitación | 69.3 | 82.64 |
| - Interpolos | 0.00592 | 0.00706 |
| - Inducido | 0.01002 | 0.011949 |

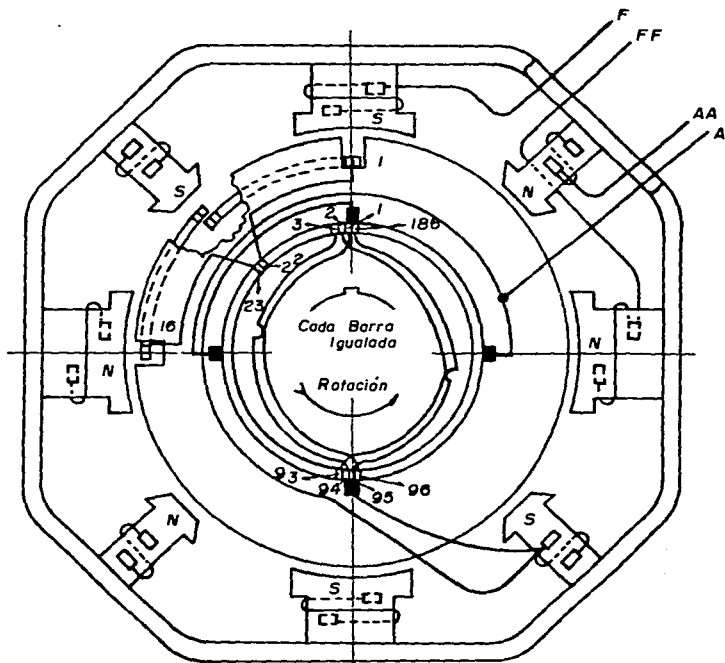


Fig-2.5 Diagrama de Generador 752

Datos sobre escobillas

- Longitud mínima 1 3/32"
- Tamaño (duplex) 3/4"X2 1/4"X2"
- Presión 10 a 12 libras.
- Claro entre portaescobillas y conmutador 1/16" a 3/32"

Datos sobre conmutador

- Diámetro en pista nuevo 16 5/8"
- Diámetro en pista mínimo 15 3/8"
- Ancho mínimo de raicer 5/8"
- Profundidad de ranurado 3/64" a 5/64"

El diagrama del generador 752 se muestra en la fig.-2.5

2.4 BANCO DE RESISTENCIAS

Basados en el voltaje de prueba (600 volts) y en la corriente del generador usado como carga (1,090 amperes), obtenemos la resistencia de carga que deberá conectarse a la salida del generador, así que:

$$R_T = 600/1,090 = 0.55046 \text{ ohms.}$$

Para poder tener una variación de la corriente de carga y hacer ajustes para mantener voltaje y/o corriente de inducido constante, tendremos 38 resistencias en paralelo del mismo valor, con lo que cada una tendrá un valor de:

$$R_L = 38R_T = 38(0.55046) = 20.917 \text{ ohms}$$

De aquí obtenemos la corriente en cada resistencia, que es:

$$I_L = 600/20.917 = 28.7 \text{ amperes}$$

Las resistencias se harán con nícrómo, el cual tiene una resistividad de 1.06×10^6 ohms-mt. y una densidad de corriente de 11.4 amp/mm^2 , con lo que el área del conductor será:

$$A = I_L/J = 28.7/11.4 = 2.51 \text{ mm}^2$$

Utilizando una cinta de 0.25 mm de grueso X 10.04 mm de ancho, la longitud de ésta será:

$$L = R_L(A)/Q = 20.917(2.51 \times 10^{-6})/1.06 \times 10^{-6} = 49.5 \text{ mts}$$

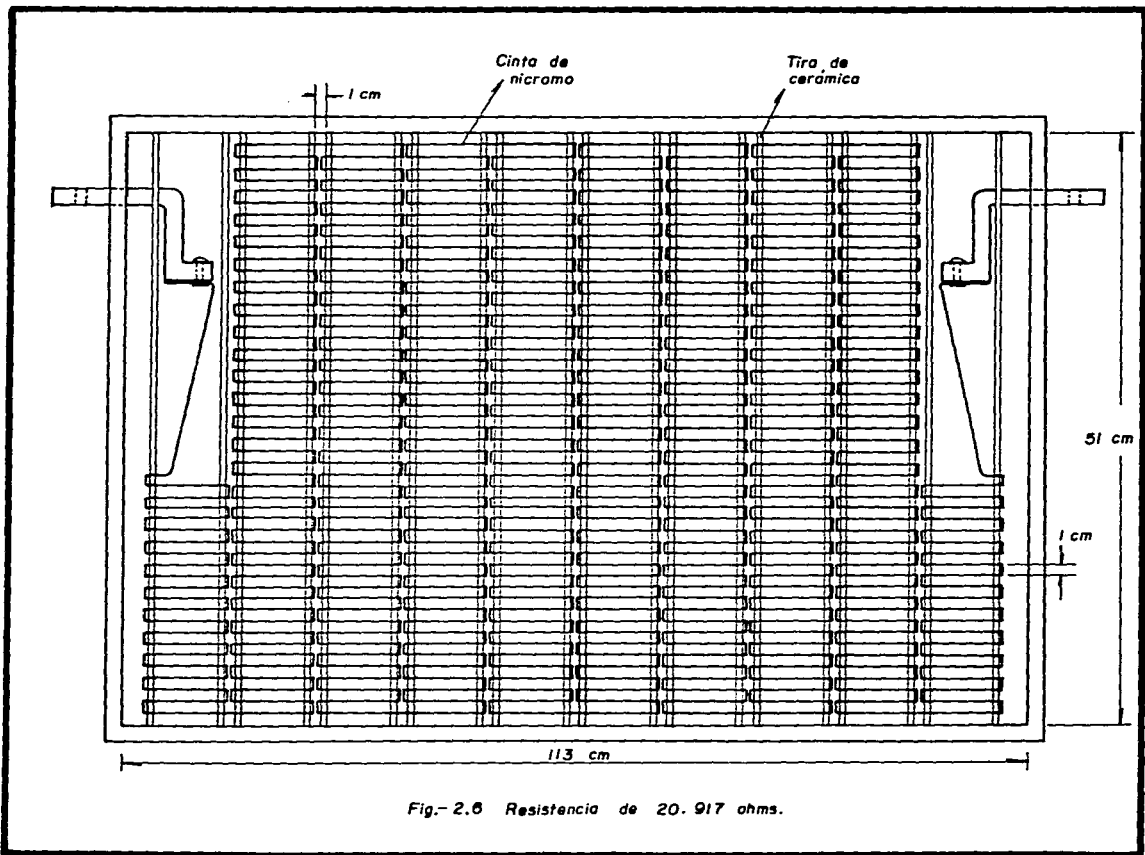
El bastidor en donde colocaremos cada resistencia será de 2.5 cm de grueso, 52 cm de alto y 113 cm de largo. El bastidor tiene 10 secciones de 10 cm cada una, más 1 cm de separación entre secciones y 2 cm a cada extremo en donde están las zapatas de salida.

El conductor se alojará en tiras de cerámica de 4 mm de grueso, las cuales tendrán 51 ranuras a 1 cm de distancia, de 0.25 mm de grueso y 15 mm de profundidad (ver fig.-2.6)

La capacidad del bastidor es:

$$L_b = 51(10 + 1) \times 10 = 5,610 \text{ cms} = 56.1 \text{ mts}$$

Como solo necesitamos 49.5 mts, eliminaremos 6.6 mts (3.3 mts a cada lado), dejando machando la cinta de nícrómo a las zapatas de cobre a la longitud exacta.



2.5 FUENTES DE EXCITACION

Se utilizarán 2 fuentes de excitación para alimentar los campos de generadores ó motores a probar y para el generador 752 usado como carga.

La capacidad de las fuentes de excitación será de 10 amperes con una variación de 0 a 600 volts.

Estas fuentes están construidas a base de un autotransformador tipo VARIAC, rectificando su salida mediante un puente de onda completa (ver fig.-2.7).

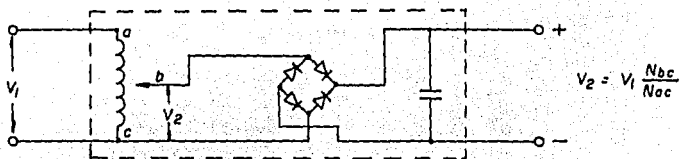


fig.-2.7 Fuente de excitación.

2.6 TACOMETRO GENERADOR

El tacómetro generador dará la velocidad de rotación de la máquina durante la prueba y servirá además de protección (ver secc.1.3).

Los datos generales del tacómetro son:

Modelo 5PY59JV1

- 2,500 RPM máximo.
- 100 volts a 1,000 RPM.
- Serie XN

2.7 AMPERIMETROS DE 2,500 AMPERES.

Estos amperímetros serán de tipo shunt, con una caída de 20 microvolts por amper; colocando un milivoltímetro de 0 a 50 tendremos la corriente de línea (el voltímetro tendrá su escala en amperes).

2.8 ELEMENTOS EN GENERAL

- 3 Reostatos de 0-50 ohms con capacidad máxima de 11 amperes.
- 8 Contactores Siemens 3TB42 con bobina 220 V, 60 Hz (CRa,CR1,CR2,CR3,CR4, CR5,CR7 y CR8)
- 1 Contactor Siemens 3TB50 tamaño 6 con capacidad para 160 amp. D.C. (CR6).
- 1 Contactor de vacío, usado como arrancador, Siemens 3TL5 0, para 3,000 volts y 300 amperes (CR).
- Capacidad interruptiva de 2,500 amp. con una vida eléctrica de los contactos en el tubo de vacío (en ciclos de switcheo) de 1'000,000.
- Tiempo de cerrado:14-48 milisegundos.
- Tiempo de apertura:21-24 milisegundos.
- 3 Amperímetros digitales de 0 a 100 amperes de corriente directa.
- 2 Voltímetros digitales de 0 a 100 milivolts (escala 0 a 2,500 amperes)
- 5 Voltímetros digitales de 0 a 1,000 volts de corriente directa.
- 2 Termómetros digitales de 0°C a 200°C

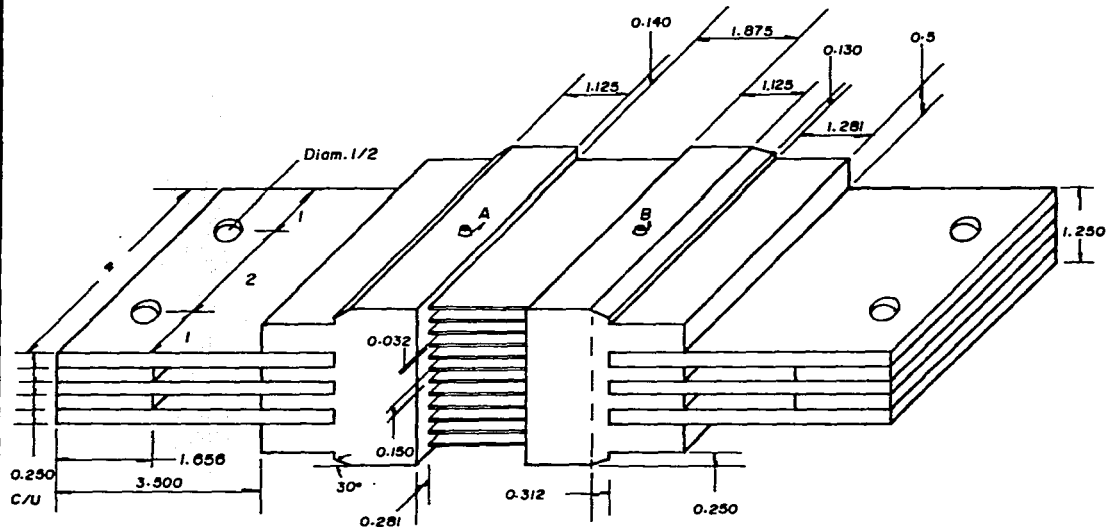


Fig.-2.B Amperímetro tipo shunt para 2,500 amp.
 con una caída de 50 milivolts entre puntos A y B.
 (Medidas en pulgadas)

III CIRCUITO EQUIVALENTE

El circuito equivalente nos servirá para determinar la potencia y las pérdidas de las máquinas bajo prueba, con lo cual podremos obtener su eficiencia.

Las pérdidas las podemos dividir en pérdidas en el cobre (P_{cob}) y pérdidas permanentes (P_o).

Las pérdidas en el cobre son proporcionales al cuadrado de la corriente de inducido (I_a)², mientras que las pérdidas permanentes son constantes.

Las pérdidas en el cobre ocurren en el inducido, campos principales (campo serie) y campos auxiliares (campo compensador e interpolos), mientras que las pérdidas permanentes ocurren en el circuito magnético, rodamiento y escobillas ($P_o = P_h + P_{par} + P_m + P_{ad}$).

3.1 POTENCIA DEL MOTOR BAJO PRUEBA

El circuito equivalente de la parte del sistema que nos interesa para determinar la potencia y las pérdidas del motor bajo prueba, son el generador 752 y el banco de resistencias (ver fig.-3.1).

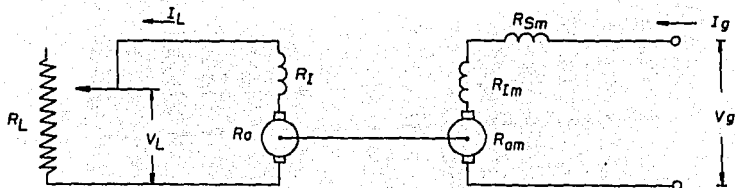


Fig.-3.1 Circuito equivalente para prueba de motores.

La resistencia $R'_{am} = R_{am} + R_{Im} + R_{sm}$ dependerán del motor bajo prueba, en donde:

R_{am} = Resistencia de inducido del motor.

R_{Im} = Resistencia de interpolos y campo compensador del motor.

R_{sm} = Resistencia de campo serie.

La potencia de entrada al motor es:

$$V_g I_g = P_f + I_g^2 R'_{am} + P_{om} \quad (3.1)$$

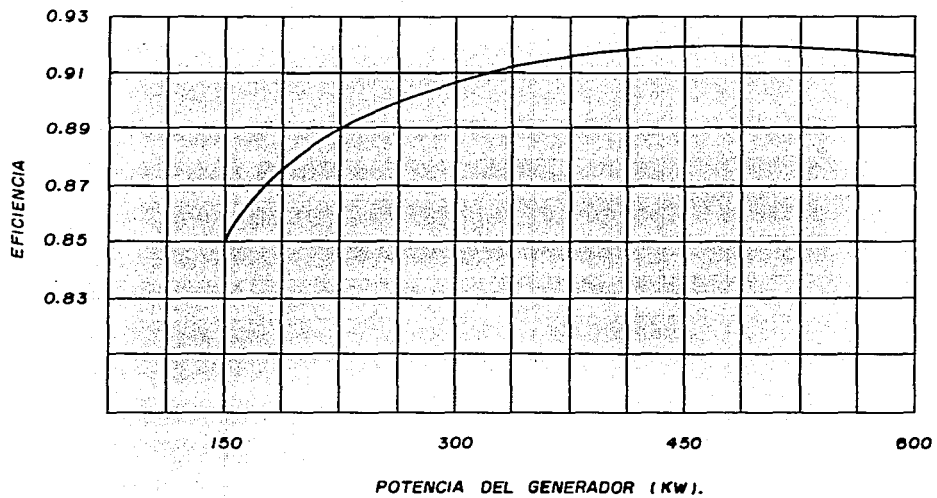


Fig.- 3.2 Característica de eficiencia del generador 752.

La potencia en la flecha (P_f) es:

$$P_f = I_L^2(R_L + R'_a) + P_{og} = I_L^2 R_L + I_L^2 R'_a + P_{og} = V_L I_L + I_L^2 R'_a + P_{og} \quad (3.2)$$

en donde P_{om} (ec. 3.1) y P_{og} (ec. 3.2), son las pérdidas permanentes en el motor y en el generador respectivamente.

Como $I_L^2 R'_a + P_{og}$ son las pérdidas totales que tiene el generador 752, éstas se pueden calcular mediante su característica de eficiencia de la fig.-3.2, en donde:

$$\eta_g = \frac{V_L I_L}{V_L I_L + I_L^2 R'_a + P_{og}}$$

de donde encontramos:

$$I_L^2 R'_a + P_{og} = \frac{V_L I_L}{\eta_g} - V_L I_L = (1/\eta_g - 1) V_L I_L \quad (3.3)$$

de aquí que la eficiencia del motor bajo prueba sustituyendo (3.3) en (3.4) es:

$$\eta_m = \frac{P_f}{I_g V_g} = \frac{V_L I_L + I_L^2 R'_a + P_{og}}{I_g V_g} = \frac{V_L I_L (1/\eta_g)}{I_g V_g} = \frac{V_L I_L}{\eta_g I_g V_g} \quad (3.4)$$

3.2 MOMENTO O PAR DE LOS MOTORES BAJO PRUEBA

La ecuación general del Momento ó Par es:

$$M = \frac{P}{2\pi S} \quad (3.5)$$

En donde P en H.P. es la energía mecánica y S las RPS desarrolladas en el inducido; como la energía mecánica que nos interesa es la desarrollada en la flecha, entonces el Momento se expresa como:

$$M_f = \frac{P_f}{2\pi S} \quad \text{en donde } M_f \text{ es el Momento en la flecha.}$$

De las ecuaciones (3.2) y (3.3) podemos expresar M_f como:

$$M_f = \frac{I_L^2(R_L + R'_a) + P_{og}}{2\pi S} = \frac{I_L^2(R_L + R'_a) + V_L I_L (1/\eta_g - 1) - I_L^2 R'_a}{2\pi S}$$

$$M_f = \frac{I_L [I_L R_L + V_L (1/\eta_g - 1)]}{2\pi S} \quad (\text{Watts-seg}) \quad (3.6)$$

Estando en función de la eficiencia del generador 752 usado como carga (η_g). La relación entre la potencia del motor y su Momento ó Par se expresa por medio de la formula:

$$H.P. = \frac{M(\text{lbs-pie})XRPM}{5,252} = \frac{2\pi M(\text{lbs-pie})XRPM}{33,000}$$

La relación entre las unidades para el Momento ó Par es:

$$1 \text{ Watt-seg} = 1 \text{ Nt-mts} = 0.738 \text{ lbs-pie.}$$

3.3 POTENCIA DEL GENERADOR BAJO CARGA

En este caso el circuito equivalente del sistema que nos interesa, es únicamente el banco de resistencias que sirve de carga al generador bajo prueba (ver fig.-3.3) y con el cual calcularemos la eficiencia del generador.

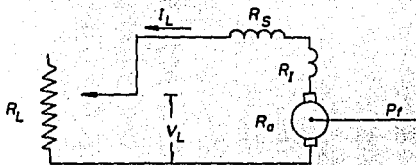


fig.-3.3 Circuito equivalente para prueba de generadores. Los valores: $R'_a = R_a + R_I + R_S$ dependerán del generador bajo prueba.

La potencia en la flecha del generador (P_f) será igual a la potencia del motor de inducción, menos las pérdidas de transmisión que se estiman en un 3% de la potencia del motor (P) aproximadamente.

$$P = \sqrt{3} VI \cos \phi \eta \quad (3.7)$$

$$P_f = P(1-0.03) = 0.97 P$$

Del circuito de la fig.-3.3 obtenemos:

$$P_f = V_L I_L + I_L^2 R'_a + P_{OG} \quad (3.8)$$

igualando ecuaciones (3.7) y (3.8) obtenemos:

$$0.97 P = V_L I_L + I_L^2 R'_a + P_{OG} \quad \therefore P_{OG} + I_L^2 R'_a = 0.97 P - V_L I_L$$

de aquí, la eficiencia del generador (η_g) es:

$$\eta_g = \frac{V_L I_L}{V_L I_L + P_{OG} + I_L^2 R'_a} = \frac{V_L I_L}{V_L I_L + 0.97 P - V_L I_L} = \frac{V_L I_L}{0.97 P}$$

$$\eta_g = \frac{V_L I_L}{(0.97) (\sqrt{3} VI \cos \phi) \eta} = \frac{0.595 V_L I_L}{VI \cos \phi \eta} \quad (3.9)$$

en donde I es la corriente, V es el voltaje entre fases y η la eficiencia del motor de inducción.

La eficiencia (η) y el factor de potencia ($\cos \phi$) se obtienen de la gráfica en fig.-3.4 que está en función de la corriente del motor.

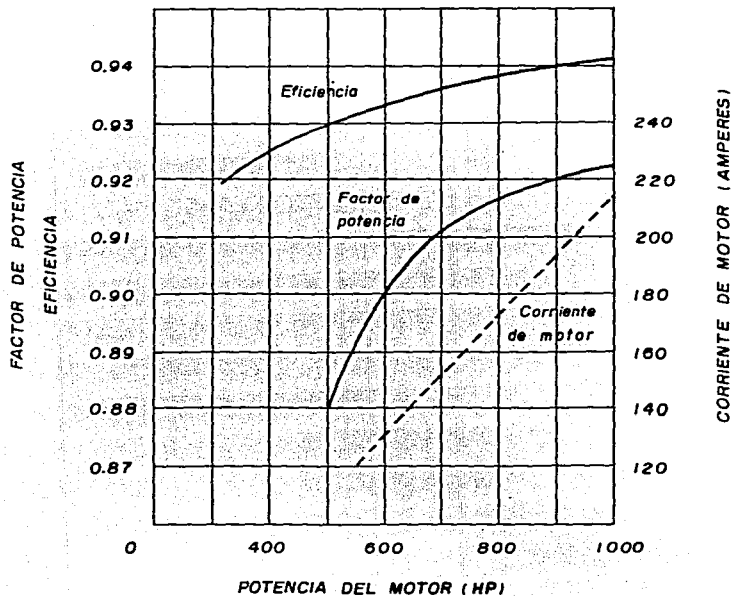


Fig.-3.4 Eficiencia, factor de potencia y corriente para cualquier potencia de motor .

IV CARACTERÍSTICAS DE MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA CON CARGA.

Las características más importantes de los motores son:

- i) Característica de velocidad ó exterior. $S=f(I_a)$, para $V_n=cte.$ e $i_{exc}=cte.$
- ii) Característica de Momento ó Par. $M=f(I_a)$, para $V_n=cte.$ e $i_{exc}=cte.$
- iii) Rendimiento. $\eta=f(I_a)$, para $V_n=cte.$ e $i_{exc}=cte.$

Basados en la segunda ley de Kirchoff, del circuito en fig.-4.1 obtenemos, para cualquier motor de corriente directa:

$$V_a = E_a + I_a R'_a \quad (4.1)$$

en donde: $V_a = V - \Delta_e$ y $R'_a = R_a + R_I + R_s$

V = Voltaje de alimentación.

Δ_e = Caída de voltaje en cepilleras.

E_a = Fuerza electromotriz en inducido.

I_a = Corriente de inducido.

R_a = Resistencia de inducido.

R_I = Resistencia de interpolos y campo compensador.

R_s = Resistencia de campo serie.

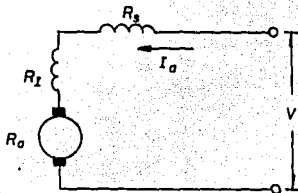


fig.-4.1 Circuito equivalente de un motor ó generador de corriente directa.

De acuerdo a la ecuación de Fem media (E_a) para un devanado de inducido de corriente directa, tenemos que es igual a:

$$E_a = (P/a)\Phi ZS \quad (4.2)$$

en donde:

P = Número de polos.

a = Número de trayectorias ó paralelos en el devanado.

Φ = Flujo magnético (Wb).

Z = Número de conductores.

S = Velocidad de rotación (RPS).

Sustituyendo ec. (4.2) en ec. (4.1) tenemos:

$$V_a = (P/a)\phi Z S + I_a R'_a$$

Despejando S, encontramos la ecuación de la velocidad de rotación para una máquina de corriente directa

$$S = \frac{V_a - I_a R'_a}{(P/a)\phi Z} \quad (4.3)$$

de donde obtenemos la característica exterior ó de velocidad $S = f(I_a)$.

Tomando la ec.(4.1) y multiplicando ambos lados por I_a y transponiendo, obtenemos la energía mecánica desarrollada en el inducido

$$E_{a-a} I_a = V_a I_a - I_a^2 R'_a = P \quad (4.4)$$

$$\text{La energía mecánica es: } P = M\omega = 2\pi M S \quad (4.5)$$

en donde: M = Momento ó Par.
 ω = Velocidad angular.

De aquí encontramos que el Momento ó Par se puede expresar como:

$$M = \frac{E_a I_a}{2\pi S} = \frac{(P/a)\phi Z S I_a}{2\pi S} = \frac{(P/a)\phi Z I_a}{2\pi} \quad (\text{Nt} \cdot \text{mt}) \quad (4.6)$$

o bien como:

$$M = 0.01624(P/a)\phi Z I_a \quad (\text{Kg} \cdot \text{mt}) \quad (4.7a)$$

$$M = 0.1175(P/a)\phi Z I_a \quad (\text{lbs} \cdot \text{pie}) \quad (4.7b)$$

de donde obtenemos la característica de Momento $M = f(I_a)$.
El rendimiento de un motor se puede expresar como:

$$\eta = \frac{V_a I_a - (P_{cob} + P_o)}{V_a I_a} = 1 - \frac{P_{cob} + P_o}{V_a I_a} \quad (4.8)$$

de donde obtenemos la característica de rendimiento $\eta = f(I_a)$

4.1 MOTORES DE EXCITACION SEPARADA Y SHUNT

1) Característica de velocidad ó exterior. $S = f(I_a)$

En este tipo de motor influyen en la velocidad solo dos factores, la caída de tensión y la reacción del inducido.

Al aumentar carga, aumenta la caída de tensión $I_a R'_a$, con lo cual tiende a disminuir la velocidad de rotación; por otro lado, al aumentar carga, aumenta la reacción del inducido que disminuye el flujo del campo principal, tendiendo a incrementar la velocidad de rotación.

Basados en esto, la característica de velocidad ó exterior del motor bajo carga a corriente nominal ($I_a = I_n$), puede ser:

- Quando predomina la caída de tensión $I_a R'_a$, la velocidad de rotación tenderá a disminuir (curva 1 en fig.-4.2).
- Quando la caída de tensión $I_a R'_a$ y la reacción del inducido están equilibradas, la velocidad de rotación tenderá a mantenerse estable (curva 2 en fig.-4.2).
- Quando predomina la reacción del inducido, la velocidad de rotación tenderá a aumentar (curva 3 en fig.-4.2).

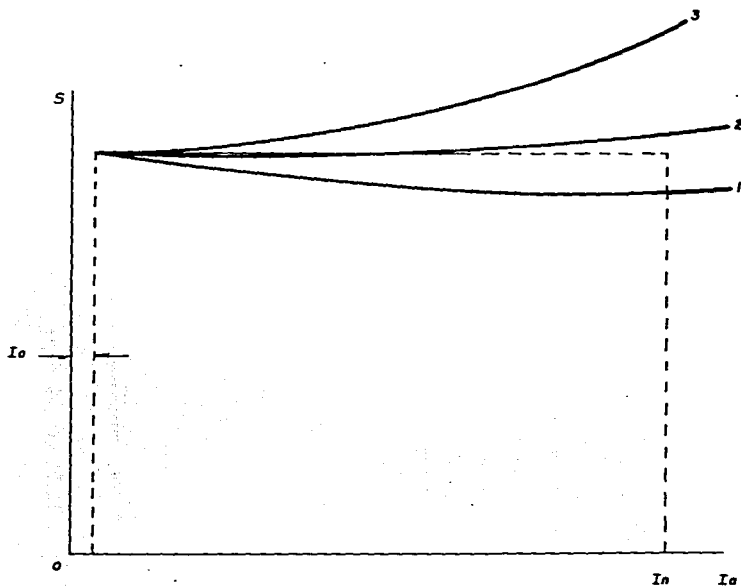


Fig.- 4.2 Característica de Velocidad ó exterior de motores de excitación separada y shunt.

La regulación de la velocidad de rotación se expresa como la variación, al pasar de la carga nominal a la marcha en vacío, en tantos por ciento de la velocidad nominal, esto es:

$$\Delta S_n = \frac{S_o' - S}{S} \times 100 \quad (4.9)$$

ii) Característica de Momento ó Par.

De acuerdo con la ec.(4.6), para marcha en vacío del motor, tenemos:

$$M_o = \frac{(P/a)\phi Z I_o}{2\pi} = \frac{P_o}{2\pi S_o} = \frac{P_m + P_h + P_{par} + P_{ad}}{2\pi S_o}$$

que representa el par necesario para vencer las pérdidas mecánicas, pérdidas por histéresis, pérdidas por corriente parásitas y pérdidas adicionales el cual se considera constante, pues la velocidad de rotación y el flujo varían relativamente muy poco.

La característica de Momento útil $M_u = f(I_a)$ inicia en el punto a (fig.- 4.3) y crece más lentamente que la corriente de armadura debido al efecto desmagnetizante de la reacción del inducido.

iii) Rendimiento.

De la ec.(4.8) tenemos que:
$$\eta = 1 - \frac{P_{cob} + P_o}{V_a I_a} = 1 - \frac{I_a^2 R_a' + P_o}{V_a I_a}$$

tomando la primera derivada de la eficiencia con respecto a la corriente de inducido e igualando a cero, encontramos la condición de máximo, con lo que obtenemos:

$$\frac{d\eta}{dI_a} = - \left[\frac{(V I_a)(2 I_a R_a') - (I_a^2 R_a' + P_o)V}{(V I_a)^2} \right] = 0$$

$$\therefore P_o = I_a^2 R_a'$$

Lo que indica que el motor alcanza su máximo de rendimiento η_{max} a tal carga, cuando las Pérdidas permanentes (P_o) son iguales a las pérdidas que dependen del cuadrado de la corriente de inducido (I_a^2).

La gráfica de rendimiento se muestra en la fig.- 4.4.

4.2 MOTOR SERIE

1) Característica de velocidad.

El factor principal en este motor es el flujo fundamental ϕ , mientras que la caída de tensión $I_a R_a'$ (que tiende a reducir la velocidad) y la reacción del inducido (que tiende a aumentar la velocidad) son factores de segundo orden.

A cargas pequeñas y medias, el circuito magnético se puede considerar no saturado, en donde el flujo ϕ y la corriente de inducido I_a , son directamente proporcionales. De la ec.(4.3) tenemos:

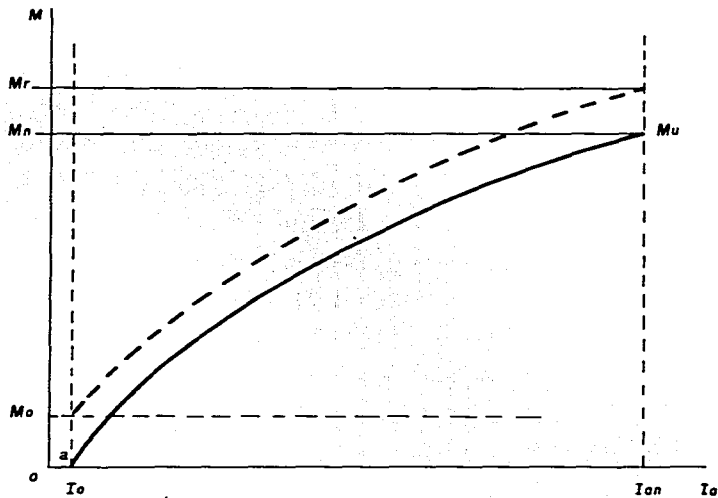


Fig.- 4.3 Característica de momento de motores shunt y de excitación separada.

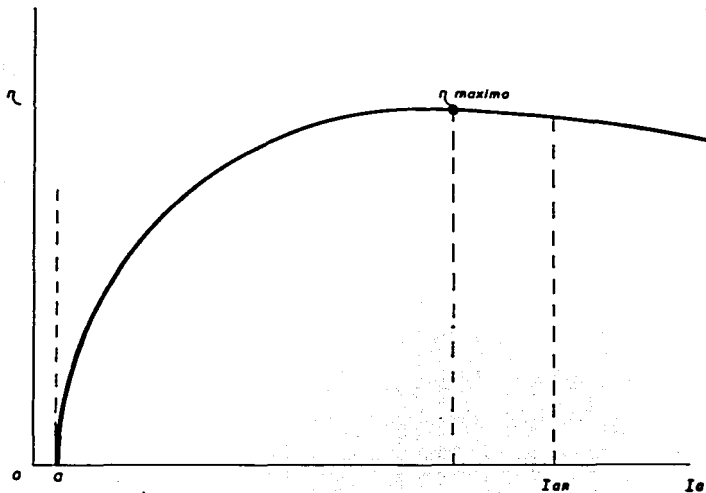


Fig.- 4.4 Característica de rendimiento.

$$S = \frac{V - I_a R'_a}{\phi(P/a)Z} = \frac{V - I_a R'_a}{K I_a (P/a)Z} = \frac{V}{K I_a (P/a)Z} - \frac{R'_a}{K(P/a)Z} \quad (4.10)$$

Es decir, la característica de velocidad del motor serie no saturado tiene caracter hiperbólico (curva 1 en fig.-4.5)

A medida que aumenta la corriente, el motor se satura más fuertemente y la velocidad de rotación comienza a variar en menor grado en comparación con su variación por la tendencia hiperbólica (curva 2 en fig.-4.5).

Ya que la velocidad de rotación varía en amplios límites, entonces, a la variación de la velocidad, al pasar de la carga nominal a un cuarto de la carga nominal, siendo $V = V_n = \text{cte.}$, se le denomina variación nominal de la velocidad de rotación expresada en tantos por ciento, con lo que:

$$\Delta S_n = \frac{S(kI_{an}) - S(I_{an})}{S(I_{an})} \times 100 \quad (4.11)$$

ii) Característica de Momento.

Basados en la ec.(4.6) tenemos:

$$M = K' \phi I_a \quad \text{en donde} \quad K' = \frac{PZ}{2\pi a}$$

Quando el acero no está saturado, el flujo ϕ es directamente proporcional a la corriente I_a ($\phi = K I_a$), por lo que podemos decir que el Momento es directamente proporcional al cuadrado de la corriente, esto es:

$$M = K'' I_a^2 \quad \text{en donde} \quad K'' = K K' \quad (4.12)$$

con lo que la característica representa una parábola (curva 1 en fig.-4.6). A medida que aumenta la corriente, el acero se satura y la curva de Momento crece más lentamente respecto de la tendencia parabólica (curva 2 en fig.-4.6).

iii) Rendimiento.

Con la variación de la carga, varían toda clase de pérdidas, aunque la suma de pérdidas mecánicas y pérdidas en el acero varían relativamente poco; esto se explica principalmente por el hecho de que con el aumento de la corriente I_a aumentan las inducciones, mientras que la velocidad de rotación disminuye.

Por esta razón podemos dividir las pérdidas en constantes y variables al igual que en ec.(4.8); con esto llegamos a la misma conclusión de que el rendimiento máximo es cuando $p_o = I_a^2 R'_a$.

4.3 MOTOR DE EXCITACION COMPUESTA EN ADAPTACION O ACUMULATIVO.

1) Característica de velocidad.

En este tipo de motor el flujo fundamental ϕ está compuesto por el flujo del campo en derivación (ϕ_1), más el flujo del campo serie (ϕ_2) con lo que

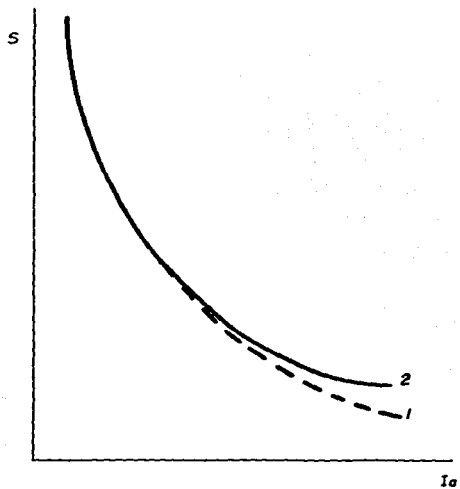


Fig.- 4.5 Característica de velocidad de un motor serie.

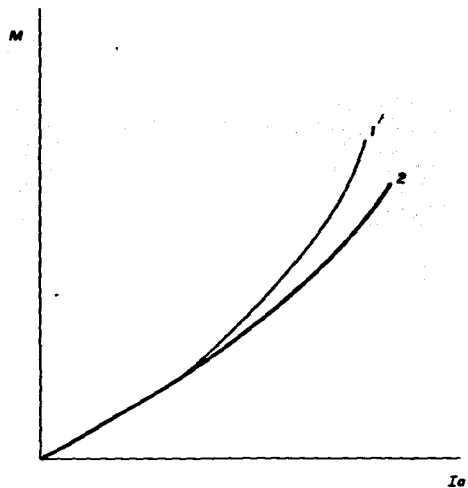


Fig.- 4.6 Característica de momento de un motor serie.

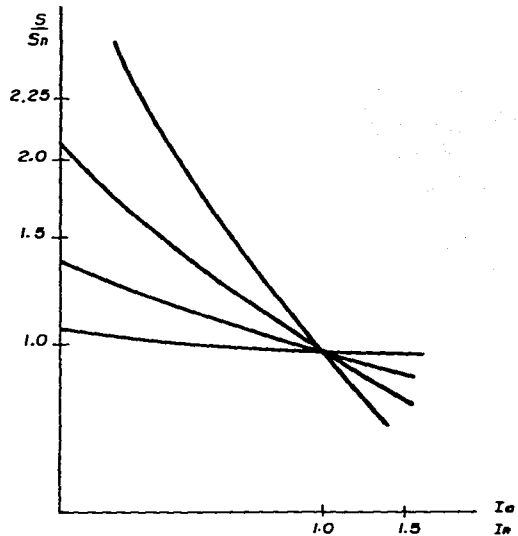


Fig.- 4.7 Característica de velocidad de motores de excitación compuesta en adaptación.

la ec.(4.3) se escribe como:

$$S = \frac{V_a - I_a R_a'}{(P/a)(\phi_1 + \phi_2)Z} \quad (4.13)$$

El flujo creado por el campo serie sirve para compensar el efecto desmagnetizante de la reacción del inducido. Dependiendo del diseño, la característica de velocidad puede tener la forma de las curvas 2 ó 3 en fig.-4.7, que ocupan una posición intermedia entre las características de velocidad de los motores de excitación separada y serie (curvas 1 y 4 respectivamente).

Para una característica de velocidad bruscamente decreciente (curva 3), el devanado shunt debe limitar únicamente el aumento de velocidad de rotación excesivo durante la caída de carga, ya que la velocidad en vacío S_0 estará determinada solo por el flujo ϕ_1 .

ii) Característica de Momento.

Basados en la ec.(4.6) tenemos que:

$$M = \frac{PZ}{2\pi a} (\phi_1 + \phi_2) I_a = \frac{PZ I_a \phi_1}{2\pi a} + K'' I_a^2 \quad (4.14)$$

La primera parte de la ecuación tenderá a disminuir debido a la reacción del inducido, mientras que la segunda parte tenderá a aumentar en forma de parábola mientras no exista saturación. Con esto el motor desarrolla un Par más alto que el motor de excitación separada a la misma corriente.

La característica de Momento es intermedia a las características de Momento de los motores de excitación separada y serie (curvas 2 y 3 respectivamente en fig.-4.8)

iii) Rendimiento [ver sección 4.1 iii)]

4.4 MOTOR DE EXCITACION COMPUESTA EN OPOSICION O DIFERENCIAL

i) Característica de Velocidad.

En este tipo de motor el flujo fundamental está compuesto por el flujo del campo en derivación (ϕ_1), menos el flujo del campo serie (ϕ_2), con lo que la ec.(4.3) resulta ser:

$$S = \frac{V - I_a R_a'}{(P/a)(\phi_1 - \phi_2)Z} \quad (4.15)$$

con lo que el flujo creado por el campo serie, ayuda al efecto desmagnetizante debido a la reacción del inducido, con lo que la característica de velocidad tenderá a aumentar, a cierta corriente, bruscamente (fig.-4.9).

A medida que crece la corriente en el inducido, el flujo disminuye, pudiendo darse el caso de llegar a la zona de inestabilidad en la curva de magnetización (sección n-n' en fig.-5.1), en cuyo caso la velocidad aumentará tan rápidamente que podrá llegar a tomar voltajes peligrosos en el inducido (después del punto A en fig.-4.9)

Por lo general el campo serie se reduce a modificar ligeramente la excitación dada por el arrollamiento derivado, de donde resulta una corrección ventajosa en la cual la velocidad se mantiene prácticamente constante dentro del tipo normal de trabajo.

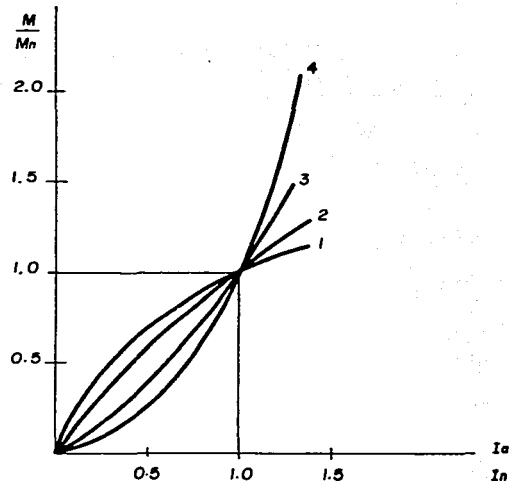


Fig.- 4.8 Característica de momento de motores de excitación compuesta en adaptación.

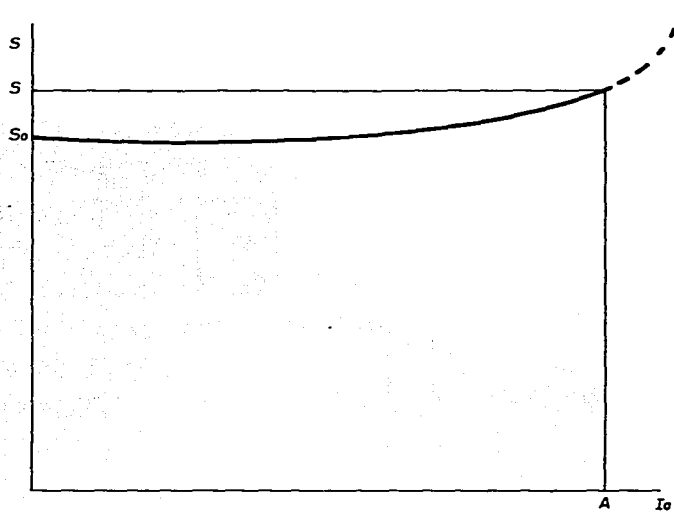


Fig.- 4.9 Característica de velocidad de un motor de excitación compuesta en oposición ó diferencial.

ii) Característica de Momento.

Basados en la ec.(4.6) tenemos que:

$$M = \frac{PZ}{2a} (\phi_1 - \phi_2) I_a = \frac{PZ\phi_1 I_a}{2a} - \frac{PZ\phi_2 I_a}{2a}$$

o bien:

$$M = \frac{PZ\phi_1 I_a}{2a} - K'' I_a^2 \quad (4.16)$$

en donde el Momento disminuye conforme aumenta la corriente de inducido, pudiendo pasar la zona de inestabilidad en el caso de una sobrecorriente y venir la fmm del devanado en derivación, invirtiendo el flujo y el sentido de rotación, acelerandose y creando una contra fem que puede ser perjudicial para el motor.

La característica de Momento es muy semejante a la del un motor en derivación (fig.-4.5).

iii) Rendimiento. [ver secc. 4.1 iii)].

V CARACTERISTICA DE GENERADORES DE CORRIENTE DIRECTA CON CARGA.

En la prueba de generadores solo hay cuatro magnitudes importantes y son:

- Tensión en terminales V (volts).
- Corriente de inducido I_a (amperes).
- Corriente de excitación I_{exc} (amperes).
- Velocidad de rotación S (rev/seg).

Como todos los generadores trabajan a velocidad de rotación constante, solo quedan tres magnitudes; la relación de estas magnitudes entre sí, establecen las características de funcionamiento de los generadores.

Las características se pueden expresar como sigue:

- i) Característica en vacío. $V = f(I_{exc})$, para $I_a = 0$.
- ii) Característica en carga. $V = f(I_{exc})$, para $I_a = \text{constante}$.
- iii) Característica exterior. $V = f(I_a)$, para $I_{exc} = \text{constante}$.
- iv) Característica de regulación ó de excitación $I_a = f(I_{exc})$, para $V = \text{constante}$.
- v) Característica en corto circuito. $I_a = f(I_{exc})$, para $V = 0$.

La fem desarrollada en un inducido de corriente directa, de acuerdo con la ec. (4.2) tenemos:

$$E_a = (P/a)\phi ZS.$$

Basados en la segunda ley de Kirchoff, de la fig.-4.1 obtenemos para cualquier generador:

$$E_a = V_a + I_a R'_a \quad (5.1)$$

de ec.(4.2) y ec.(5.1) obtenemos:

$$V_a = (P/a)\phi ZS - I_a R'_a \quad (5.2)$$

Como el flujo ϕ está en función de la corriente de excitación $\phi = f(I_{exc})$, la ec. (5.2) se puede expresar como:

$$V_a = (P/a) ZS f(I_{exc}) - I_a R'_a \quad (5.3)$$

Para $I_a = 0$, obtenemos la característica en vacío, que repite en cierta escala la curva característica de imantación de la máquina; para $I_a = \text{constante}$, obtenemos la característica en carga.

De ec.(5.2), obtenemos la característica exterior, manteniendo $I_{exc} = \text{constante}$ (ϕ casi constante), al encontrar la variación de la tensión en bornes del generador pasando de la carga en vacío hasta la carga plena.

Esta variación se expresa en tantos por ciento de la tensión nominal (V_n), por lo que:

$$\Delta V = \frac{V_0 - V_n}{V_n} \times 100 \quad (5.4)$$

La característica de regulación ó de excitación, se obtiene, manteniendo en ec. (5.3) $V_a = \text{constante}$ con lo que:

$$I_a = \frac{f(i_{exc})(P/a)ZS - V_a}{R'_a} \quad (5.5)$$

Quando $V_a = 0$, obtenemos la característica en corto circuito y la ec.(5.5) quedará como:

$$I_a = \frac{(P/a)ZS}{R'_a} f(i_{exc}) \quad (5.6)$$

5.1 GENERADOR DE EXCITACION INDEPENDIENTE

1) Característica en vacío. $V = f(i_{exc})$, para $I_a = 0$.

Puesto que en los polos siempre hay flujo magnético residual, entonces cuando $i_{exc} = 0$, en las terminales del generador se obtiene una tensión V_0 que normalmente es de un 2% a un 3% de la tensión nominal V_n ($V_0 = 0A$ en fig.-5.1).

Al variar la corriente de excitación desde 0 hasta su valor máximo $i_{exc} = 0C$, la tensión crece según la curva OD hasta un valor máximo $V_{max} = CD$, que normalmente es de 1.1 a 1.25 de la tensión nominal V_n .

La parte inicial de la curva característica en vacío representa prácticamente una recta, debido a que a pequeñas corrientes de excitación, casi toda la fuerza magnetizante se consume en la transmisión del flujo magnético a través del entrehierro, es decir, actúa en un medio con permeabilidad magnética constante.

A medida que aumenta la corriente de excitación y correspondientemente el flujo, el acero de la máquina comienza a saturarse y al principio obtenemos la parte de saturación media ó el así llamado "codo" de la curva; luego obtenemos la parte fuertemente saturada.

El punto N, que corresponde a la tensión nominal V_n , habitualmente se encuentra en el codo de la curva, puesto que durante el funcionamiento de la máquina en la parte recta de la curva (n-n' en fig.-5.1), la tensión del generador es inestable y al funcionar en la parte fuertemente saturada, la posibilidad de regulación es limitada.

Para evaluar la saturación en un punto de la curva, se calcula la relación entre los incrementos relativos de la excitación $\Delta i_{exc}/i_{exc}$ y la tensión $\Delta V/V$; al resultado se le denomina "factor de saturación" (f_s) y se expresa como:

$$f_s = \frac{\Delta i_{exc}/i_{exc}}{\Delta V/V} = \frac{(i_{exc2} - i_{exc1})/i_{exc1}}{(V_2 - V_1)/V_1} \quad (5.7)$$

Al inverso del factor de saturación (f_s) restado de la unidad y multiplicado por 100 se denomina "Porcentaje de saturación"

$$\% \text{ sat} = \left(1 - \frac{1}{f_s} \right) \times 100 \quad (5.8)$$

También puede expresarse en porcentaje de la variación de corriente de excitación, por la relación de la separación entre la curva y la parte inicial prolongada, así que de fig.-5.1 tenemos que:

$$\% \text{ sat} = \frac{RN}{ON} \times 100 \quad (5.9)$$

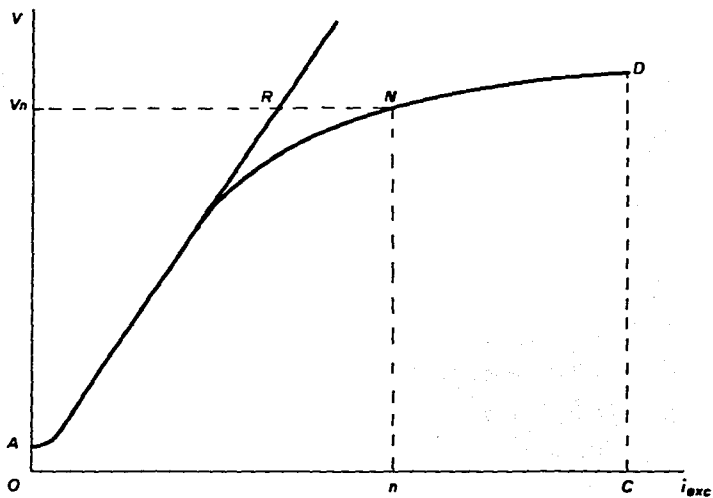


Fig.-5.1 Característica en vacío de un generador de excitación independiente.

ii) Característica en carga. $V = f(I_{exc})$, para $I_a = \text{constante}$.

La característica en carga pasa por debajo de la característica en vacío debido a la disminución de tensión en terminales del generador como resultado de:

a) La caída de tensión $I_a R_a'$.

b) Reacción del inducido.

En la fig.-5.2, las curvas 1 y 2 representan las características en vacío y en carga respectivamente. Si añadimos el valor de la tensión $I_a R_a'$ a la característica en carga, obtenemos la característica en carga interior (curva 3).

La característica en carga, trazada junto con la característica en vacío, nos permite construir el " triángulo característico " del generador. Este triángulo nos da la posibilidad de valorizar la caída de tensión debida a la reacción del inducido, además puede ser utilizado para trazar las características exterior y de regulación.

El cateto CB es la caída de tensión $I_a R_a'$ y el segmento BF es la caída de tensión debido a la reacción del inducido (ver fig.-5.2)

Para $I_a = \text{constante}$, el cateto $BC = I_a R_a'$ permanece constante en su magnitud, independientemente de la corriente de excitación I_{exc} , pero el cateto AB, permanecerá invariable solo en el caso cuando se puede desprestigiar la influencia de la saturación. A medida que aumenta la saturación, la influencia de la reacción transversal del inducido comienza a reflejarse cada vez más fuertemente y en correspondencia con esto, aumenta cada vez más el cateto AB.

El segmento $B|B_1$ representa la diferencia entre $A_1 B_1 - A_1 B$ y corresponde al circuito magnético saturado; el segmento $A_1 B$ = AB corresponde al circuito no saturado y representa la fuerza magnetizante (fm) de la reacción longitudinal del inducido.

Si la máquina permaneciera no saturada también para grandes valores de corriente de excitación, entonces obtendríamos la característica en carga desplazando el triángulo ABC paralelamente a sí mismo de tal modo que el vértice A se encuentre siempre en la característica en vacío (línea de trazos, curva 4).

iii) Característica exterior. $V = f(I_a)$, para $I_{exc} = \text{constante}$.

La variación de la tensión V y la corriente I_a se expresa en tantos por ciento de la tensión y corrientes nominales ó sea:

$$\frac{V}{V_n} = 1 \quad \text{e} \quad \frac{I_a}{I_{an}} = 1$$

Al descargar la máquina gradualmente desde la plena carga a la marcha en vacío, la tensión del generador crecerá según curva 1 en fig.-5.3, debido a que disminuye la caída de tensión $I_a R_a'$ y la reacción del inducido.

Puesto que R_a' se puede considerar constante, la relación $f(I_a) = I_a R_a'$ se expresa por medio de la recta 2.

La relación $V + I_a R_a' = E_a = f(I_a)$, se expresa por la curva 3 y se llama característica interior del generador.

iv) Característica de regulación. $I_a = f(I_{exc})$, para $V = \text{constante}$.

Puesto que para $I_{exc} = \text{constante}$, la tensión en terminales del generador V, disminuye con el aumento de la corriente de inducido I_a y viceversa (fig.-5.3), entonces para mantener constante la magnitud de la tensión V, será necesario aumentar la corriente de excitación al aumentar carga y disminuirla al disminuir carga. En el primer caso actuamos por la parte ascendente de la curva de imantación y en el segundo caso, por la parte descendente (ver fig.-5.4), esto debido al ciclo de histéresis de la curva de imantación del generador, al pasar de 0 a I_{exc} máxima y de I_{exc} máxima a 0 (ver fig.-5.5).

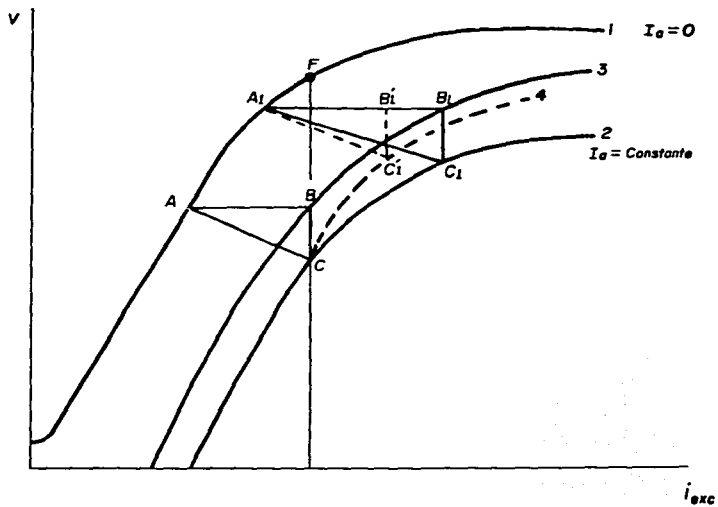


Fig.- 5.2 Característica en carga de un generador de excitación independiente.

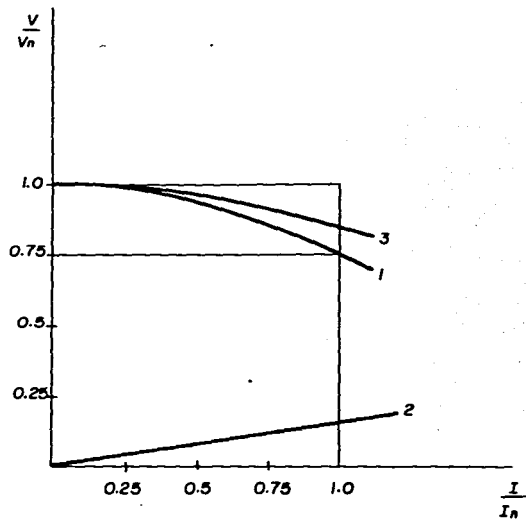


Fig.- 5.3 Característica exterior de un generador de excitación independiente.

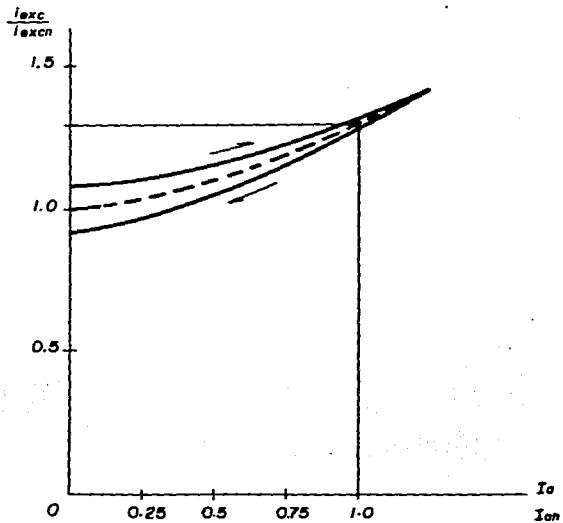


Fig.- 5.4 Característica de regulación ó de excitación de un generador de excitación Independiente.

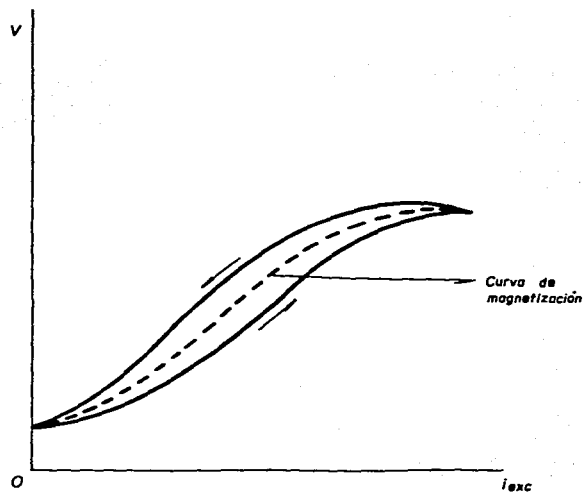


Fig.- 5.5 Efecto de histeresis sobre la curva de magnetización.

La curva media, trazada con línea punteada entre la parte ascendente y descendente se nombra como " característica práctica de regulación " (fig.-5.4)

Con la ayuda de la característica en vacío, podemos trazar el triángulo característico para cualquier corriente de inducido; teniendo como dato la caída de tensión $I_a R'_a$, obtenemos la caída de tensión y la fuerza desmagnetizante debido a la reacción del inducido,

Si no existiera reacción del inducido, todos los lados del triángulo característico variarían proporcionalmente a la corriente de inducido.

R'_a se puede considerar constante, así que el único lado del triángulo que varía proporcionalmente a la corriente de inducido es el cateto BC.

v) Característica en corto circuito. $I_a = f(I_{exc})$, para $V = 0$.

Con la resistencia de carga igual a cero, la ecuación de la fem se expresa como:

$$E_a = I_a R'_a = I_c R'_a$$

O sea que durante el cortocircuito del generador, la fem E_a es igual solo a la caída de tensión en el circuito de inducido, campo serie, interpolos, campo compensador y escobillas. Para $I_{an} = I_c$, la fem E_a habitualmente es mayor que la tensión nominal unos tantos por ciento. En estas condiciones se puede considerar que el circuito magnético no está saturado y que la característica en vacío en esta sección representa una línea recta (recta 1 en fig.-5.6).

Despreciando la variación de la resistencia de contacto de las escobillas y considerando R'_a constante, la característica de cortocircuito representará una recta para valores entre $1.1 I_{an}$ y $1.25 I_{an}$ (recta 2).

Para $I_{exc} = 0$, existe en el inducido corriente de cortocircuito $I_{c0} = 0a$, debido al flujo residual que crea la fem $E_a = 0b$ (fig.-5.6).

Prolongando rectas 1 y 2, en la intersección con el eje de abscisas, encontramos el punto O' ; aquí el segmento $O'C$ representa la f.m. total del cortocircuito para $I_c = I_{an}$.

Esta fuerza magnetizante (f.m.) debe ser suficiente para crear la fem $E_a = I_{an} R'_a$ (segmento $O'D$) y compensar la reacción del inducido (segmento DC).

Como en cortocircuito, el circuito magnético del generador no está saturado, se puede considerar que la reacción transversal del inducido no provoca efecto desmagnetizante y durante la conmutación rectilínea, cuando no existe la reacción de conmutación del inducido, el cateto $AB = DC$ (fig.-5.6), corresponde únicamente a la f.m. de la reacción longitudinal del inducido, que surge en el generador, al desviar las escobillas de la línea neutra magnética en el sentido de rotación del inducido.

Cuando las escobillas están colocadas en la línea neutra magnética, no existe reacción longitudinal del inducido y por consiguiente, el cateto AB es casi igual a cero. Si las escobillas se han desviado de la línea neutra magnética en sentido opuesto al de rotación del inducido, la reacción longitudinal del inducido ejerce efecto magnetizante y el cateto $B'A'$ se sitúa a la derecha del cateto BC (triángulo 2 en fig.-5.6)

5.2 GENERADOR AUTOEXCITADO O EN DERIVACION.

1) Condiciones de autoexcitación.

Para que un generador se pueda excitar por sí mismo, es necesario que exista un flujo de imantación remanente (Φ_0) entre un 2% y 3% del flujo normal.

El campo en derivación se cierra a través de una resistencia variable (R_v).

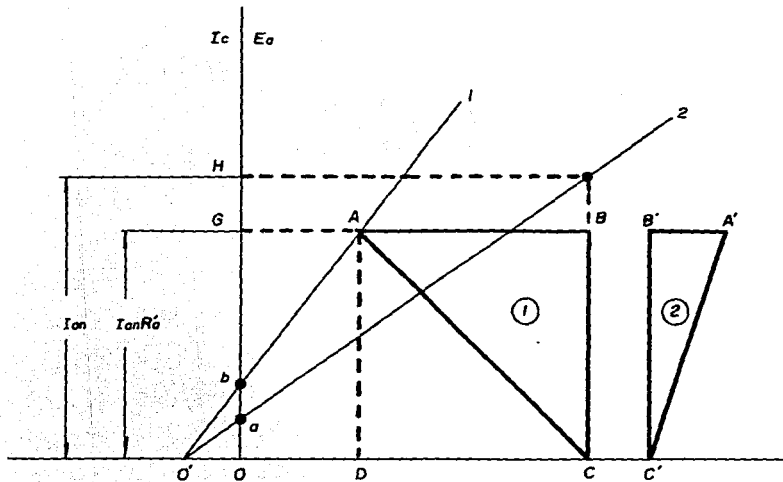


Fig.- 5.6 Característica de cortocircuito para $I_c = I_{on}$
de un generador de excitación independiente.

Al girar el generador a su velocidad nominal, tendremos una fem entre un 2% y 3% del voltaje nominal V_n , con lo que circulará una corriente de pequeña intensidad en el campo de excitación, creando un flujo Φ'_0 . En dependencia del sentido de la corriente, el flujo Φ'_0 puede ser dirigido en sentido opuesto ó en el mismo sentido que el flujo remanente Φ_0 ; de aquí se puede decir, que el proceso de autoexcitación del generador puede transcurrir solamente cuando el flujo Φ_0 es dirigido en el sentido determinado por el flujo remanente Φ_0 .

Un aumento en la fem provoca un aumento en la corriente de excitación, el cual provoca también un aumento en la fem; ahora bien, el límite hasta la cual transcurre el proceso de autoexcitación, se determina en el circuito de excitación de la fig.-5.7, considerando $i_a=0$.

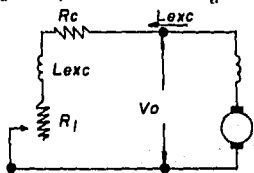


fig.-5.7 Circuito de excitación de un generador en derivación.

$$V_o = i_{exc} R_{exc} + L_{exc} \frac{di_{exc}}{dt}$$

ó bien:

$$L_{exc} \frac{di_{exc}}{dt} = V_o - i_{exc} R_{exc} \quad (5.10)$$

El proceso de excitación finaliza cuando la diferencia $V_o - i_{exc} R_{exc}$ es igual a cero, que es en la intersección de la característica en vacío y la caída de tensión $i_{exc} R_{exc}$ (curva 2 y recta 1 respectivamente en fig.-5.8) en el punto A.

Si R_{exc} =constante, la caída de tensión $i_{exc} R_{exc}$ varía directamente proporcional a la corriente i_{exc} (recta 1). El ángulo α lo forma con el eje de abscisas en donde:

$$\tan \alpha = \frac{i_{exc} R_{exc}}{i_{exc}} = R_{exc} \quad (5.11)$$

Por lo que a cada valor de R_{exc} le corresponde una recta particular que parte del origen bajo un ángulo α .

Al aumentar R_{exc} , aumenta el ángulo α , con lo cual el punto A se desliza por la característica en vacío en dirección al origen O. A cierto valor, la recta 1 será tangente a la curva 2, que corresponde a la parte inicial de la característica en vacío; a éste valor de resistencia se le denomina resistencia crítica R_{exc-cr} , ya que a éste valor de resistencia, el generador prácticamente no se excita (recta 3).

ii) Característica en vacío. $V = f(i_{exc})$, para $i_a=0$.

Entre las características en vacío de un generador de excitación independiente y un generador autoexcitado ó en derivación, no existe diferencia alguna, puesto que la corriente de excitación ($i_{exc} = i_a$) que circula por el inducido no supera el 3% de la corriente nominal, por lo que no puede provocar una variación notable a la tensión en terminales.

iii) Característica en carga. $V = f(i_{exc})$, para i_a = constante.

Esta característica es prácticamente igual a la de un generador de excitación independiente (ver secc. 5.1).

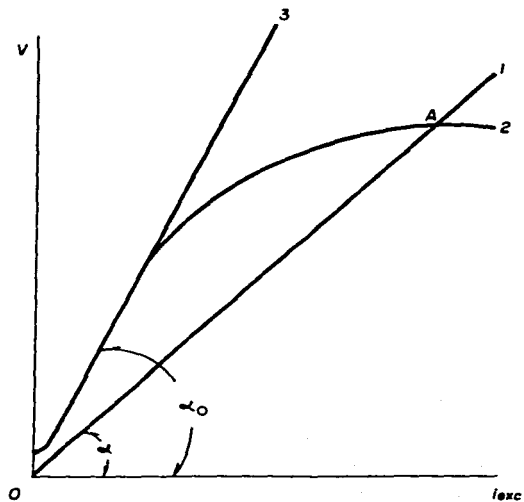


Fig.- 5.8 Condiciones de autoexcitación de un generador en derivación ó shunt.

iv) Característica exterior. $V = f(I_a)$ para $R_{exc} = \text{constante}$.

Esta característica nos debe revelar la influencia de la variación de la carga en la tensión del generador sin regulación alguna de la corriente de excitación. Al aumento de carga, la tensión en terminales disminuye debido a tres factores:

- Caída de tensión $I_a R_a'$.
- Reacción del inducido.
- Disminución de i_{exc} proporcionalmente a la tensión.

Debido al tercer factor, se explica la diferencia entre las características de los generadores de excitación independiente y autoexcitado (curvas 1 y 2 respectivamente en fig.-5.9).

Al disminuir la resistencia de carga, en el caso de excitación independiente, la corriente I_a crecerá continuamente y alcanzará su valor máximo cuando la resistencia de carga sea igual a cero, o sea, en el régimen de cortocircuito del generador. En el caso de autoexcitación, la corriente I_a crecerá solo hasta un valor de "corriente crítica" (I_{cr}), que habitualmente no pasa de $2I_{an}$ a $2.5I_{an}$ y luego comenzará a disminuir, debido a los tres factores ya mencionados que provocan caída de tensión, pasando de un estado fuertemente saturado a un estado no saturado hasta alcanzar la corriente de cortocircuito I_{co} determinada unicamente por el flujo de imantación remanente.

v) Característica de regulación. $I_a = f(i_{exc})$, para $V = \text{constante}$.

Esta característica es igual que para un generador de excitación separada (ver secc.-5.1 iv)).

vi) Característica en cortocircuito. $I_a = f(i_{exc})$, para $V = 0$.

Esta característica no puede ser trazada para un generador autoexcitado, ya que si $V = 0$, implica que $i_{exc} = 0$.

5.3 GENERADOR SERIE.

Como en éste generador $I_a = i_{exc}$, las características en vacío, en carga y en cortocircuito, solo pueden ser trazadas teniendo el campo excitado independientemente del inducido.

La única característica que puede ser trazada, es la característica exterior, en donde el voltaje de salida está en función de la corriente de inducido (i).

En la fig.-5.10, la curva 1 representa la característica en vacío, la curva 2 la característica exterior, la recta 3 la caída de tensión $I_a R_a'$ y la curva 4, la característica interior del generador.

La diferencia entre curvas 1 y 4 se debe a la reacción del inducido.

Para $I_a = I_{an} = 1$, el triángulo $A_n B_n C_n$ representa el triángulo característico del generador a corriente nominal. Desplazando el cateto $A_n B_n$ paralelo al eje de abscisas de tal manera que A_n permanezca siempre sobre la característica en vacío y variando proporcionalmente a la corriente I_a , se puede trazar la característica exterior.

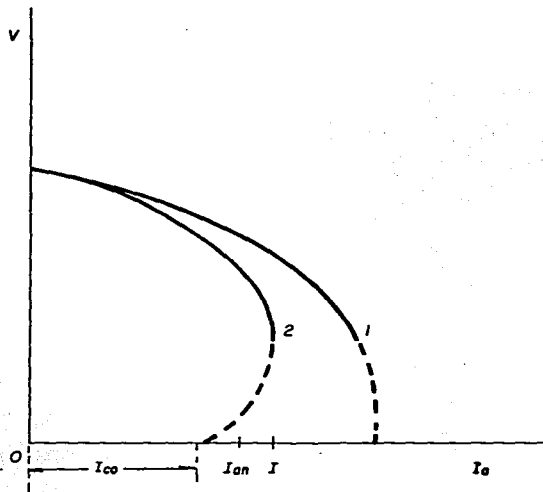


Fig- 5.9 Característica exterior de un generador auto-excitado ó en derivación.

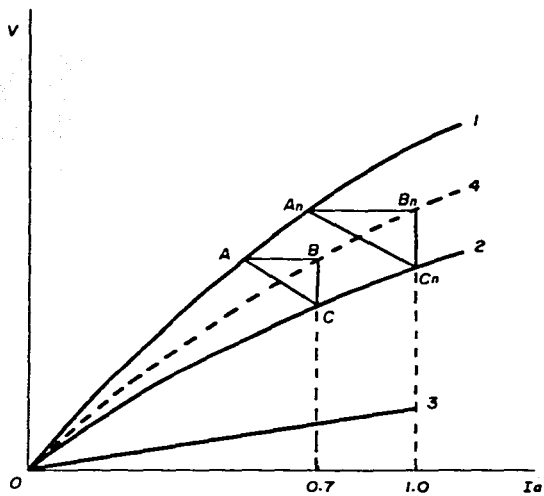


Fig.- 5.10 Característica exterior de un generador serie.

5.4 GENERADOR DE EXCITACION COMPUESTA EN ADAPTACION O ACUMULATIVO.

Este generador contiene devanados en derivación y en serie, con los flujos creados en un mismo sentido y reúne en sí las características de los generadores autoexcitado y serie.

El campo en derivación puede conectarse como shunt corto ó shunt largo, ya que entre ambos no existe prácticamente diferencia alguna debido a la baja resistencia del campo serie.

A éste generador se le denomina compound y el objetivo fundamental, es aumentar la f.m. que actúa en el circuito magnético, en proporción con el aumento de la corriente de inducido I_a .

i) Característica en vacío. $V = f(I_{exc})$, para $I_a = 0$.

Esta característica se traza de igual forma que para un generador de excitación independiente, ya que la corriente de inducido es igual a cero.

ii) Característica en carga. $V = f(I_{exc})$, para $I_a = \text{constante}$.

Dependiendo del diseño del campo serie, podemos obtener un voltaje en terminales a carga plena:

- a) Menor que en vacío (Sub-compuesto).
- b) Igual que en vacío (Equi-compuesto).
- c) Mayor que en vacío (Hyper-compuesto).

Basados en el triángulo característico ABC en fig.-5.11, tenemos que el lado AB corresponde a la suma algebraica de la f.m. del devanado en serie (F_{as}) y la f.m. de la reacción del inducido (F_{ar}) en donde $F_{AB} = F_{as} - F_{ar}$ en la escala de la corriente de excitación.

Cuando la f.m. del campo serie es mayor a la f.m. de la reacción del inducido, el cateto AB' se sitúa a la derecha del cateto AC, en donde el punto C' describirá la característica en carga del generador.

iii) Característica exterior. $V = f(I_a)$, para $R_{exc} = \text{constante}$.

Como los flujos actúan en el mismo sentido, la característica se obtendrá sumando la característica ascendente del generador serie con la característica descendente del generador autoexcitado.

La excitación serie compensa la f.m. de la reacción del inducido conforme aumenta la carga del generador. Al aumentar la corriente del inducido, el flujo total en cada polo será $\Phi_t = \Phi_1 + \Phi_2$ en donde Φ_2 es el flujo creado por el campo serie; si el efecto magnetizante del campo serie es mayor que el efecto desmagnetizante de la reacción del inducido, aumentará el voltaje en terminales y la corriente de excitación.

Al incrementar carga, la f.m. del campo serie en relación con la f.m. de la reacción del inducido puede quedar como:

$$\begin{array}{l} F_{as} > F_{ar} \Rightarrow E_a \text{ e } I_{exc} \text{ son mayores que en vacío.} \\ F_{as} = F_{ar} \Rightarrow E_a \text{ e } I_{exc} \text{ son iguales que en vacío.} \\ F_{as} < F_{ar} \Rightarrow E_a \text{ e } I_{exc} \text{ son menores que en vacío.} \end{array}$$

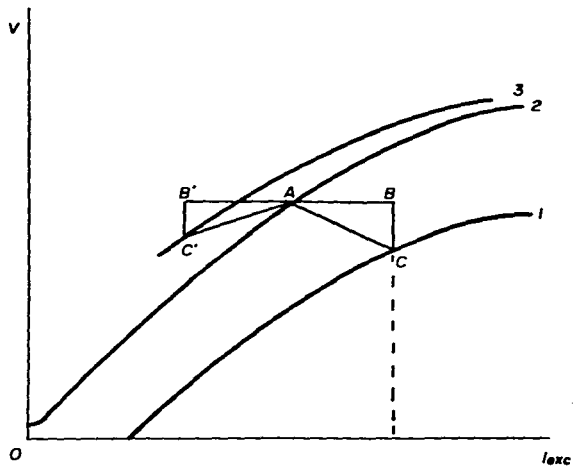


Fig.- 5.11 Característica en carga de un generador de excitación compuesta en adaptación ó acumulativo.

Por lo que la característica exterior será como se muestra en la fig.-5.12, para generadores sub-compuestos (curva 1), equicompuestos (curva 2) e hiper-compuestos (curva 3).

• Cuando $I_a > I_{ap}$, el cateto AB comienza a crecer no proporcionalmente a la corriente de inducido I_a (fig.-5.2), esto como resultado de:

- a) La saturación considerable de la zona de los dientes bajo la arista posterior del polo, a causa de lo cual aumenta bruscamente el efecto desmagnetizante de la reacción transversal del inducido.
- b) La reacción de conmutación del inducido, por la saturación de los polos auxiliares (interpolos) y la conmutación adquiere carácter de acelerado; en este caso la reacción de conmutación del inducido ejerce efecto desmagnetizante respecto del campo fundamental, es decir, actúa en el mismo sentido que la reacción transversal del inducido.

iv) Característica de regulación ó de excitación. $I_a = f(i_{exc})$, para $V = \text{constante}$.

Basados en la ec.(5.2), la fem de un generador compuesto en adaptación será:

$$V = (P/a)(\phi_1 + \phi_2)SZ - I_a R'_a \quad (5.12)$$

Para poder mantener constante el voltaje en terminales y dependiendo del flujo creado por el campo serie, será necesario disminuir la corriente de excitación en generador hipercompuestos y equicompuestos (curvas 1 y 2 respectivamente en fig.-5.13) ó aumentarla para generadores subcompuestos (curva 3).

v) Característica en corto circuito. $I_a = f(i_{exc})$, para $V = 0$.

Esta característica no puede ser trazada [ver secc. 5.2 vi)].

5.5 GENERADOR DE EXCITACION COMPUESTA EN OPOSICION O DIFERENCIAL.

Este tipo de generadores son usados principalmente para soldadura, debido a su característica exterior relacionando favorablemente voltaje en terminales y corriente de inducido.

i) Característica en vacío. $V = f(i_{exc})$, para $I_a = 0$.

Esta característica se traza de igual forma que para un generador de excitación independiente.

ii) Característica en carga. $V = f(i_{exc})$, para $I_a = \text{constante}$.

A esta característica habrá que agregar un factor más que provoca caída de tensión, respecto al generador autoexcitado y es la disminución de la fem debido al efecto desmagnetizante del campo serie respecto del campo en derivación, el cual puede compararse a una reacción de inducido exagerada.

La forma de obtener la característica en carga es semejante que en la secc. 5.1 ii).

iii) Característica exterior. $V = f(I_a)$, para $R_{exc} = \text{constante}$.

Al aumentar carga, la característica exterior presenta un descenso muy pronunciado a cierta corriente de inducido, la cual es próxima a la corriente de cortocircuito (ver fig.-5.14); a esta corriente crítica el voltaje desciende hasta cero con lo que la ec. general de la fem será:

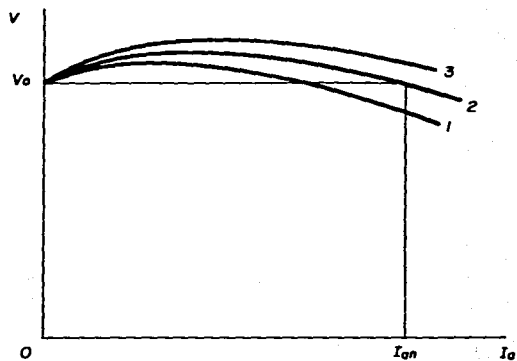


Fig.- 5.12 Característica exterior de un generador compuesto en adaptación o acumulativo.

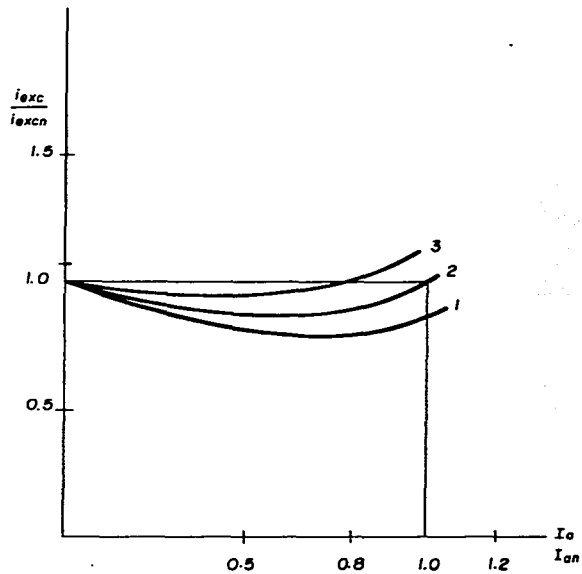


Fig.- 5.13 Característica de regulación ó de excitación de generadores compuestos en adaptación ó acumulativo.

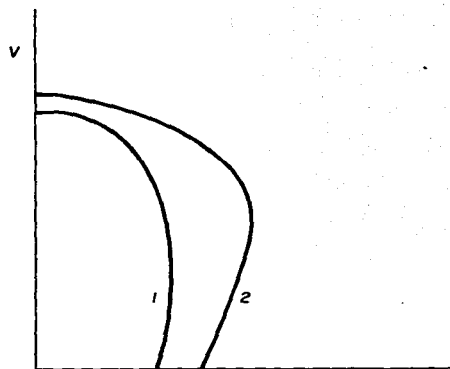


Fig.- 5.14 Característica exterior de un generador de excitación compuesta en oposición ó diferencial .

$$(P/a)(\phi_1 - \phi_2)ZS - I_a R_a' = 0 \quad (5.13)$$

El flujo creado por el campo en derivación es inversamente proporcional a la resistencia de excitación, esto es:

$$\phi_1 = K i_{exc} = K \frac{E_a}{R_{exc}} \quad (5.14)$$

Con lo que podemos decir que para una característica bruscamente decreciente, la resistencia de excitación debe ser alta, limitando al flujo ϕ_2 creado por el campo serie y manteniendo prácticamente constante la corriente de inducido durante el descenso del voltaje en terminales (curva 1 en fig.-5.14).

Para una característica exterior con un descenso menos pronunciado, la resistencia de excitación debe ser menor, limitando aún más el flujo ϕ_2 , así como a la intensidad de corriente de inducido, que disminuye parecido al generador autoexcitado (curva 2 en fig.-5.14)

VI PRUEBA DE MOTORES A CARGA PLENA

Como primer paso a realizar, será necesario anotar los datos generales del motor en la sección I del formato de fig.-6.4 y así poder determinar las condiciones de la prueba.

Antes de iniciar la prueba del motor ó generador, éste deberá estar perfectamente alineado y nivelado, para evitar errores por causas mecánicas.

Si el motor ó generador tiene cepilleras deslizables, se deberá realizar una prueba para determinar si los carbonos están ó no situados en la zona neutra magnética ó zona neutra de conmutación. La prueba consiste en:

- i) Conectar un voltímetro a cepilleras (ver fig.-6.1), que tenga escala con cero al centro ó un voltímetro normal con su aguja desviada de cero, seleccionando una escala baja (0 a 3 volts ó 0 a 10 volts).
- ii) Mediante un interruptor, conectar y desconectar el voltaje nominal del campo de excitación.
- iii) Si hay un voltaje ó desviación de aguja en el voltímetro, será necesario girar las cepilleras hasta registrar cero volts ó no desviación de la aguja. Si al girar las cepilleras aumenta el voltaje ó la desviación de la aguja, el giro fué dado en sentido equivocado, por lo que se deberá girar en sentido opuesto.

Otro método propuesto para localizar el eje neutro magnético, en especial para los motores serie es el siguiente:

- i) Conectar una fuente de voltaje variable de corriente directa a interpolos en serie con armadura [A₁ y A₂ en fig.-6.2 a) y b)].
- ii) Hacer pasar una corriente de armadura (I_a) del 20% al 30% de la nominal, incrementando el voltaje gradualmente desde cero.
- iii) Los interpolos actuarán en este caso como campos principales; si las cepilleras están fuera de posición, harán girar al inducido en un sentido de rotación muy lenta (20 a 60 RPM).
- iv) Marcar la posición del aro portacepilleras, anotar la velocidad que tiene el sentido de giro [ver fig.-6.3 a)].
- v) Girar el aro portacepilleras en un sentido; si la velocidad de rotación aumenta, entonces se deberá girar el aro portacepilleras en sentido opuesto hasta que el inducido cambie su sentido de giro opuesto al encontrado en iii).
- vi) Detener el aro portacepilleras cuando la velocidad de rotación sea igual al que se encontró en el punto iv) y marcar su posición [fig.-6.3 b)].
- vii) El aro deberá colocarse al centro de las dos marcas, la cual será la posición del eje neutro magnético; en esta posición el inducido no debe girar [fig.-6.3 c)].

Como se puede observar, este tipo de prueba se puede realizar con una fuente de 0 a 40 volts con 250 amperes para máquinas grandes ó con 30 amperes para máquinas medianas y chicas.

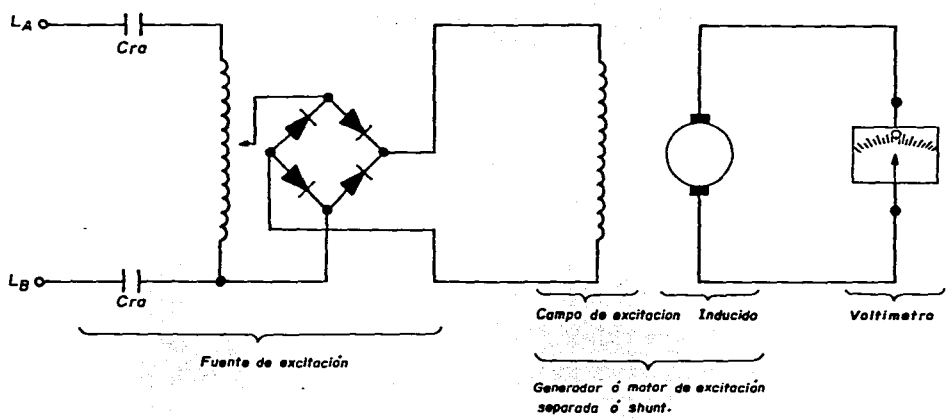


Fig. 6.1 Circuito para localizar la zona neutra magnética.

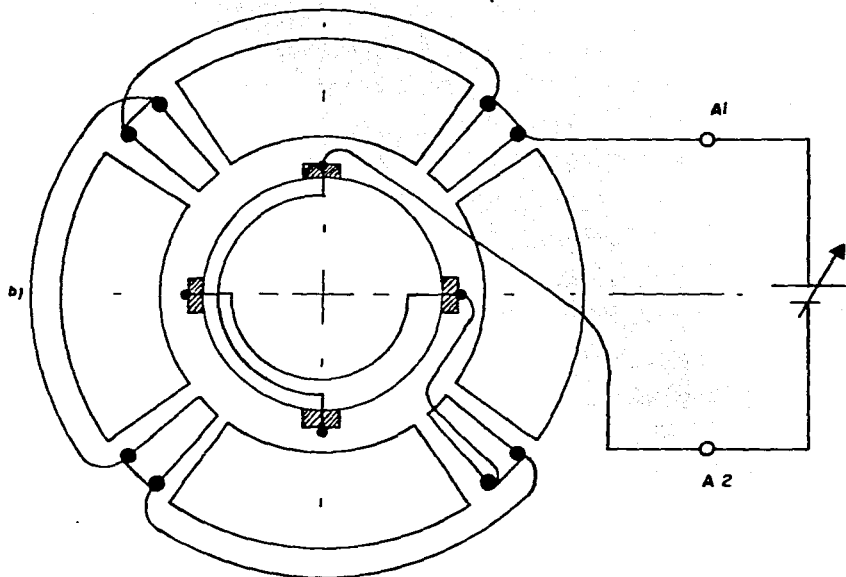
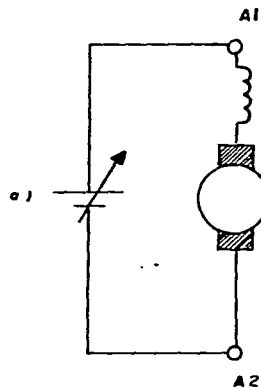


FIG- 6.2 CONEXION DE INTERPOLOS E INDUCIDO A FUENTE VARIABLE PARA LOCALIZAR EL EJE NEUTRO MAGNETICO

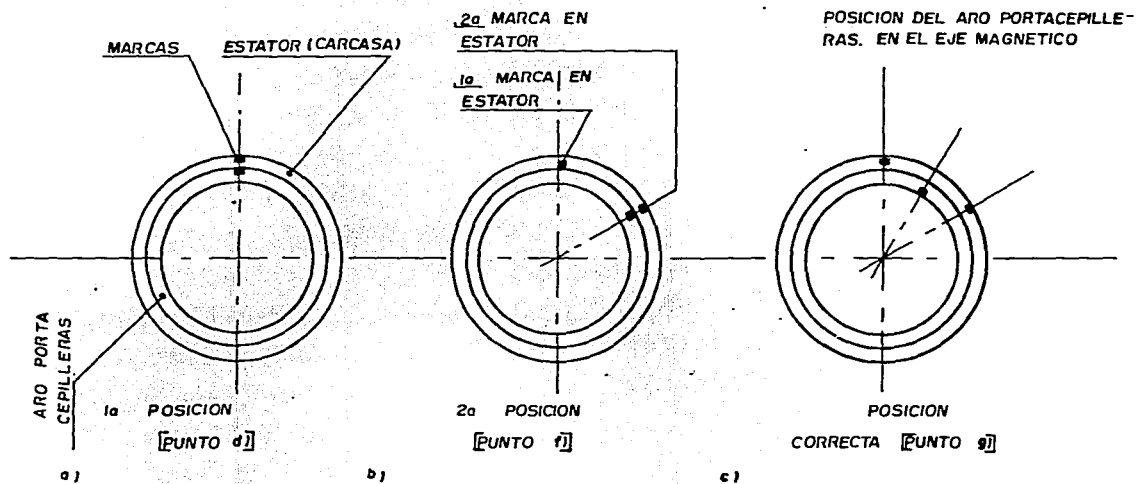


FIG. 6.3 LOCALIZACION DEL EJE NEUTRO MAGNETICO INDICANDO LA POSICION CORRECTA DEL ARO.

Durante las pruebas que se realizarán tendremos algunos porcentajes de error debido principalmente a dos factores; el primero será debido al porcentaje de exactitud de los instrumentos de medición que normalmente tienen un $\pm 1\%$ de error. Al intervenir en un cálculo más de un instrumento, nos incrementará este factor de error si las dos lecturas fallan hacia el rango superior ó hacia el rango inferior, produciendo un nuevo factor de $\pm 2\%$. Por ejemplo, dos magnitudes ó lecturas x e y y combinando sus porcentajes de error (al multiplicarse) nos darán como máximo $1.02xy$ y como mínimo $0.98xy$, esto es:

$$(1.01x)(1.01y) = 1.02xy$$

$$(0.99x)(0.99y) = 0.98xy$$

Debido a esto, las lecturas combinadas (ya calibrados los medidores), serán exactas hasta un $\pm 2\%$.

El segundo factor que puede interferir en las pruebas, será el tipo de carbón que se utilice y el grado de conmutación ó chisporroteo que tenga la máquina, ya que si normalmente en el carbón debe haber máximo una caída de 1.5 volts, esta puede incrementarse al usar carbones inapropiados (ver tabla I), combinar calidad de carbones y en el grado de conmutación (ver tabla II), lo cual producirá una temperatura excesiva que no es normal en el conmutador y a la vez en el devanado de inducido, incrementando con esto la resistencia óhmica R_a^1 y las pérdidas en el cobre $I_a^2 R_a^1$.

Después de ajustar las cepilleras, se probará el motor durante 50 minutos, comenzando a un 12.5% de su potencia nominal e incrementandola en 12.5% cada 5 minutos hasta llegar al 100%; transcurrido el tiempo a potencia nominal (P_n), aumentaremos hasta 110% de la potencia nominal durante 10 minutos.

Para poder calcular los valores de eficiencia y momento, se deberá leer la sección II en fig.-6.4 y así poder trazar las curvas.

La velocidad de rotación (S), se tomará directamente del tacómetro generador; la eficiencia y el momento se calcularán de acuerdo a ecuaciones (3.4) y (3.6) respectivamente.

Calculadas la eficiencia, el momento y obtenida la velocidad directamente, se podrán trazar las curvas en el formato de fig.-6.5.

Terminada la prueba bajo carga, se girará el motor en vacío a su velocidad de rotación nominal durante dos horas como ya se había mencionado.

Terminada la prueba a velocidad nominal, se sobregirará un 20% arriba de la nominal durante 15 minutos; la temperatura no deberá exceder de 35° Centígrados sobre la temperatura ambiente. Las lecturas se anotarán y graficarán en secc.-III de fig.-6.4.

Por lo general la temperatura se estabiliza después de hora y media de estar girando.

| | | | | | | |
|---------------|-------------------------|---------------------|----------|------------------------------------|--------------------------|--------------|
| Sección (I) | Cliente: | | | Fecha: | | |
| | Marca: | | Modelo: | | No. De serie: | |
| | Tipo: | Carcasa: | | Aislamiento clase: | | |
| | Potencia: | (KW) | Voltaje: | (Volts) | Corriente: | (AMP) |
| | RPM: | Voltaje excitación: | | (Volts) | Corriente de excitación: | (AMP) |
| | Tipo de motor: | | | Sentido de rotación (L.C.): | | |
| | Resistencias (ohms): | | 20 °C | 75 °C | Numero de polos: | |
| | Campo shunt: | | | Numero de ranuras: | | |
| | Campo serie: | | | Numero de delgas: | | |
| | Campo compensador: | | | Paralelos (a): | | |
| | Interpolos: | | | Conductores por bobina: | | |
| | Inducido: | | | Paso: | | |
| | Devanado de Inducido: | | | | | |
| | Dimension de carbones: | | | | | |
| | Carbones por cepillera: | | | Cepilleras deslizables: (Grados) | | |
| | Balero L.C.: | | | Balero L.P.: | | |
| | Vueltas: | Shunt: | Serie: | | Interpolos: | Compensador: |
| Conductor | Inducido: | | | | | |
| | Campo shunt: | | | | | |
| | Campo serie: | | | | | |
| | Interpolos: | | | | | |
| | Campo compensador: | | | | | |

Fig. 6.4 Formato de información y prueba de máquinas de corriente directa (Secc. I)

| | | | | | | | | | | | |
|------------|---------|------|--------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|-----|------------|-------|
| Sección II | T (Min) | % Pn | P (Kw) | I _g (AMP) | V _g (volts) | I _L (AMP) | V _L (volts) | R _L (ohms) | RPM | M (W. Seg) | h (%) |
| | 5' | 12.5 | | | | | | | | | |
| | 10' | 25 | | | | | | | | | |
| | 15' | 37.5 | | | | | | | | | |
| | 20' | 50 | | | | | | | | | |
| | 25' | 62.5 | | | | | | | | | |
| | 30' | 75 | | | | | | | | | |
| | 35' | 87.5 | | | | | | | | | |
| | 40' | 100 | | | | | | | | | |
| | 50' | 110 | | | | | | | | | |

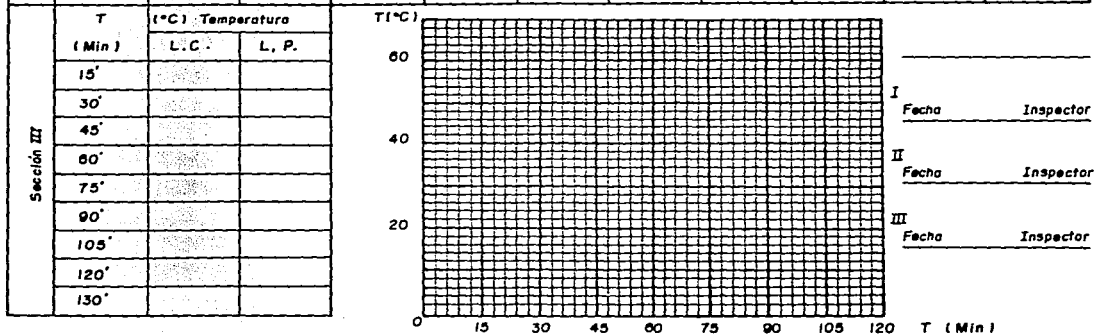


Fig. 6.4 Formato de información y prueba de maquinas de corriente directa.
(Secc. II y III)

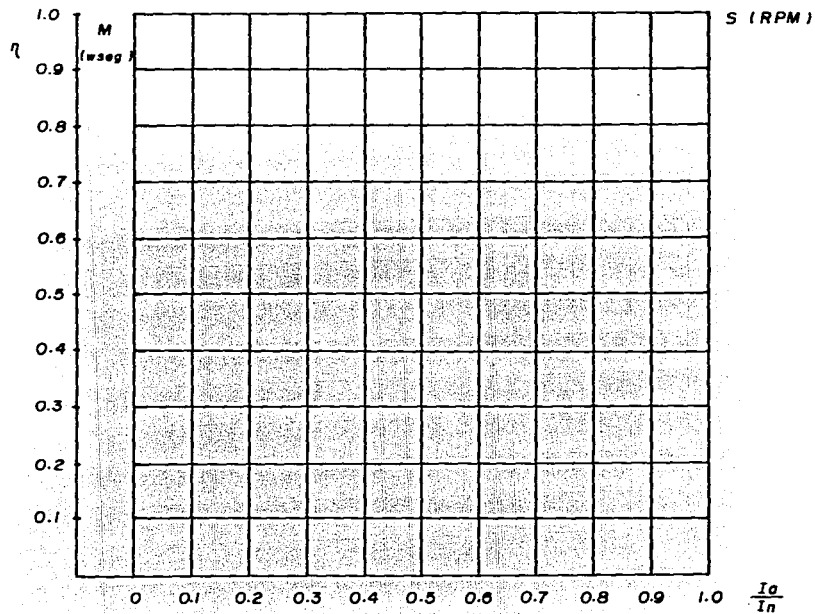


Fig. 6.5 Formato para trazar las curvas de eficiencia (η_m) de momento (M) Y de velocidad (S).

ESTA TESIS NO DEBE
 SALIR DE LA BIBLIOTECA

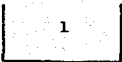
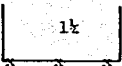
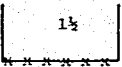
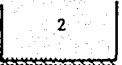
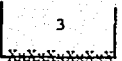
E L E C T R O G R A F I T O

T A B L A I

| tipo de carbón | calidad | G | V | ρ | d | Dureza Rockwell B | Aplicación principal |
|----------------|---------|----|----|--------|------|-------------------|--|
| | RE12 | 12 | 50 | 43 | 1.52 | 90HR 10/90 | Máquinas estacionarias de C.D. de conmutación difícil. |
| | RE18 | 10 | 45 | 30 | 1.65 | 85HR 10/150 | Máquinas medianas de corriente directa. |
| | RE19N1 | 10 | 45 | 25 | 1.70 | 90HR 10/150 | Motores de tranvías y de trenes mineros. |
| | RE28 | 12 | 45 | 45 | 1.63 | 75HR 10/100 | Máquinas medianas y chicas de C.D. |
| | RE50 | 8 | 80 | 9 | 1.30 | | Anillos acero vel. periférica mayor 35 m/ |
| | RE53 | 12 | 45 | 40 | 1.57 | 80HR 10/100 | Grandes generadores de corriente directa. |
| | RE54 | 10 | 40 | 19 | 1.60 | 75HR 10/60 | Máquinas medianas de C.D. de baja carga. |
| | RE59 | 12 | 45 | 50 | 1.65 | 80HR 10/150 | Motores locomotora de corriente alterna. |
| | RE59N1 | 12 | 45 | 50 | 1.67 | 95HR 10/150 | Motores de tracción de C.D. y C.A. |
| | RE60 | 12 | 50 | 52 | 1.63 | 75HR 10/150 | Generadores medianos y grandes (Excitadores de turbogenerador) |
| | RE75 | 12 | 45 | 30 | 1.58 | 65HR 10/100 | Motores de C.D. medianos y chicos de conmutación difícil. |
| | RE92 | 12 | 50 | 14 | 1.48 | 60HR 10/40 | Máquinas grandes y medianas de C.D. |
| | RE98 | 12 | 60 | 60 | 1.40 | 45HR 10/60 | Máquinas grandes de C.D. de conmutación difícil. |
| | RE140 | 10 | 45 | 90 | 1.62 | 95HR 10/100 | Motores de tracción de cercanías con regulación "Chopper". |
| | RE170 | 10 | 45 | 70 | 1.65 | 95HR 10/100 | Motores de tracción de cercanías con regulación reostato. |

G Densidad de corriente amp/mm²; V Velocidad periférica mts/seg; d densidad gr/cm³
 ρ Resistividad en micro-Ohms-mts;

T A B L A II

| Grado de chisporroteo | Característica del grado de chisporroteo | Estado del conmutador y las escobillas |
|---|---|--|
|  <p>1</p> | Ausencia de chisporroteo (Commutación oscura). | Ausencia de ennegrecimiento en el conmutador y de costras en las escobillas. |
|  <p>1 1/2</p> | Chisporroteo puntual débil bajo una parte pequeña de la escobilla (carbón). | Aparición de huellas de ennegrecimiento en el conmutador que se elimina fácilmente frotando la superficie del conmutador con solvente, así como huellas de costra en las escobillas. |
|  <p>1 1/2</p> | Chisporroteo débil bajo la mayor parte de la escobilla. | Aparición de huellas de ennegrecimiento en el conmutador que no se elimina frotando la superficie del conmutador con solvente, así como quemadura y destrucción de las escobillas. |
|  <p>2</p> | Chisporroteo bajo todo el lado de la escobilla. Se admite solo en los casos de golpes de corta duración de la carga y sobrecarga. | Ennegrecimiento considerable en el conmutador que no se elimina frotando la superficie del conmutador con solvente, así como quemadura y destrucción de las escobillas. |
|  <p>3</p> | Chisporroteo considerable bajo todos los lados de la escobilla con presencia de desprendimiento de grandes chispas. Se admite solo en los instantes de conexión directa (sin etapas de reostato). | |

VII PRUEBA DE GENERADORES

En la prueba de generadores, anotaremos sus datos generales en la sección I del formato en la fig.-6.2; únicamente la sección II cambiará, la cual estará dividida en tres partes: A, B y C (ver fig.-7.1).

La parte A será para anotar los datos obtenidos en la prueba en vacío (1) y en carga (2). La parte B para la prueba de característica exterior (3) y la parte C para las pruebas de regulación (4) y de corto circuito (5).

Ya con los datos obtenidos podremos trazar las características en el formato de fig.-7.2 en donde se deben usar la relación de unidades correctas, dependiendo del número encerrado entre paréntesis, así:

(1) y (2) indican la relación de unidades V/V_n vs I_{exc}/I_{exc_n}

(3) indica la relación de unidades V/V_n vs I_a/I_{an}

(4) y (5) indican la relación de unidades I_a/I_{an} vs I_{exc}/I_{exc_n}

El número entre paréntesis indica la característica a trazar.

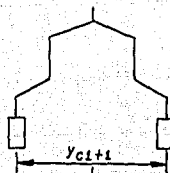
Para poder hacer uso correcto de la sección I en formato de fig.-6.2, en lo que corresponde a los paralelos (a) y al tipo de devanado de inducido, será necesario entender:

I) Devanado ondulado:

- Paralelos (a_1): $a_1 = 2m_1$

- Factor de paso en conmutador (Y_{c1}):

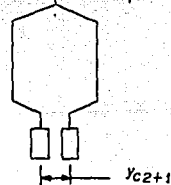
$$Y_{c1} = \frac{K \pm m_1}{P/2}$$



II) Devanado lábrico:

- Paralelos (a_2): $a_2 = Pm_2$

- Factor de paso (Y_{c2}): $Y_{c2} = \pm m_2$



en ambos devanados (ondulado e lábrico) al determinar su factor de paso (Y_{cn}), usando el signo (+), el devanado será progresivo y usando el signo (-), el devanado será retrogresivo ó regresivo.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---|----------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|-------|-------|--|
| Sección II | A | $I_a/I_{an}=0$ | | $= 0.25$ | | $= 0.5$ | | $= 0.75$ | | $= 1.0$ | | $= 1.1$ | | $= X$ | | | | |
| | | V | I_{exc} | V | I_{exc} | V | I_{exc} | V | I_{exc} | V | I_{exc} | V | I_{exc} | V | I_{exc} | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B | | I_{exc} | | $= 0.75$ | | $= 0.80$ | | $= 0.85$ | | $= 0.90$ | | $= 1.0$ | | $= 1.1$ | | $= X$ | | |
| | | V | I_a | V | I_a | V | I_a | V | I_a | V | I_a | V | I_a | V | I_a | V | I_a | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C | | $V/V_{an}=0$ | | $= 0.5$ | | $= 0.75$ | | $= 0.875$ | | $= 1.0$ | | $= 1.1$ | | $= X$ | | | | |
| | | I_a | I_{exc} | I_a | I_{exc} | I_a | I_{exc} | I_a | I_{exc} | I_a | I_{exc} | I_a | I_{exc} | I_a | I_{exc} | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Fig. 7.1 Sección II modificada para prueba de generadores en donde I_{exc} e I_a estan en amperes y V en volts.

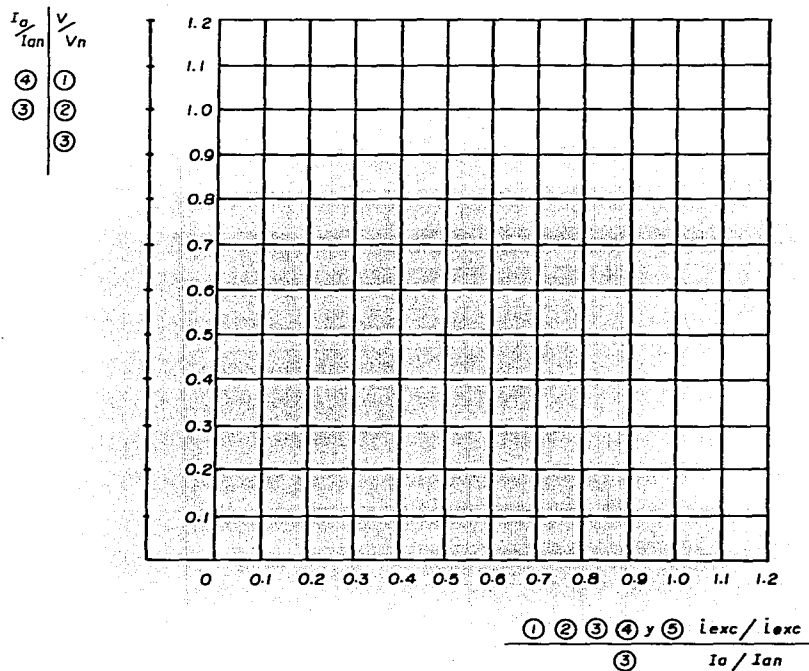


Fig. 7.2 Formato para trazar las características de los generadores.

iii) Devanado compuesto (anca de rana) $a_1 = a_2$

- Paralelos (a_3): $a_3 = a_1 + a_2 = 2m_1 + Pm_2$

por lo general en este tipo de embobinados, el devanado ímbrico es simple ($m_2 = 1$), por lo que: $m_1 = p/2$

$$a_3 = 2m_1 + P \cdot 1 \quad a_3 = 2P$$

En embobinados combinados, siempre un devanado debe ser progresivo (por lo general el ímbrico) y otro regresivo para que la f.m. de los devanados actúe en el mismo sentido.

Los símbolos anteriores son:

K = Número de delgas de colector.

P = Número de polos.

m_1 = Multiplicidad para devanados ondulados.

m_2 = Multiplicidad para devanados ímbricos.

a = Número de paralelos en embobinado.

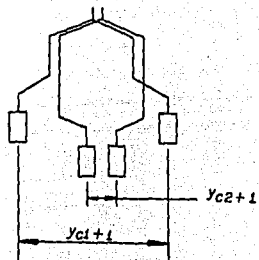
para $m_1 = 1$ el devanado será simple.

$m_1 = 2$ " " " duplex.

$m_1 = 3$ " " " triplex.

$m_1 = 4$ " " " cuádruplex.

·
·
·
·
·



VIII CONCLUSIONES

Durante la reconstrucción, prueba y armado se pueden cometer errores que pueden alterar el funcionamiento eléctrico, magnético y/o mecánico de la máquina; cualquiera de estas alteraciones pueden causar la pérdida parcial o total del embobinado, la laminación y/o los rodamientos o chumaceras.

Una falla en campo de la máquina representa pérdidas muy costosas en la productividad en donde va instalada pues se pierde demasiado tiempo en el transporte, instalación y desmontaje, identificación de la falla, acciones correctivas, etc.

La revisión de la máquina a carga plena dentro de la planta de fabricación o dentro del taller de reconstrucción, representa aproximadamente un 98% de fiabilidad de que la máquina funcionará apropiadamente al ser instalada.

De no hacerse la revisión a plena carga, el porcentaje de fiabilidad puede disminuir hasta un 70% o menos, dependiendo de los métodos de fabricación o reconstrucción y de los métodos de prueba usados, lo cual representa costos de operación muy altos.

La fabricación de un sistema de pruebas de motores y generadores de corriente continua a plena carga, rechazará toda aquella máquina que no cumpla con las especificaciones requeridas, lo cual bajarán los costos de operación en los puntos ya mencionados y además en las visitas técnicas de mantenimiento.

BIBLIOGRAFIA

- ANSI/IEEE Standar 113-1985 TEST PROCEDUR FOR DIRECT CURRENT MACHINES
- ANSI/IEEE Standar 11-1980 ROTATING ELECTRIC MACHINERY FOR RAIL AND ROAD VEHICLES
- LANGSDORF ALEXANDER S. - PRINCIPIOS DE LAS MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA
Mc.Graw-Hill 1964
- KOSTENKO Y PIOTROVSKI - MAQUINAS ELECTRICAS I. MIR Moscú.
- IRWING L. COSOW - MAQUINAS ELECTRICAS Y TRANSFORMADORES
Reverté 1980.
- FITZGERALD/KINGSLEY/UHMANS -ELECTRIC MACHINERY
McGraw-Hill 4a. ed. 1983
- SISKIND -ELECTRICAL MACHINES -McGraw-Hill 2a. ed.
- STEPHEN J. CHAPMAN -MAQUINAS ELECTRICAS -McGraw-Hill 1988.
- DAWES L. CHESTER -TRATADO DE ELECTRICIDAD. 1.CORRIENTE DIRECTA. Gustavo Gil 9a.ed.
- SMEATON W. ROBERT -MOTOR APPLICATION AND MAINTENANCE HANDBOOK, McGraw-Hill 1969.
- SEIDMAN/MAHROUS/HICKS -MANUAL DE CALCULOS DE INGENIERIA ELECTRICA. McGraw-Hill 1984.
- SYED A. NASAR -MAQUINAS ELECTRICAS Y ELECTROMECHANICAS. McGraw-Hill serie Schaum 1982.
- RESNICK & HALLIDAY -FISICA I Ed. CECSA 7a. ed.