

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

Tesis previa a la obtención del Título de

Ingeniero Eléctrico

"AUTOEXCITACION DE LA MAQUINA SINCRONICA"

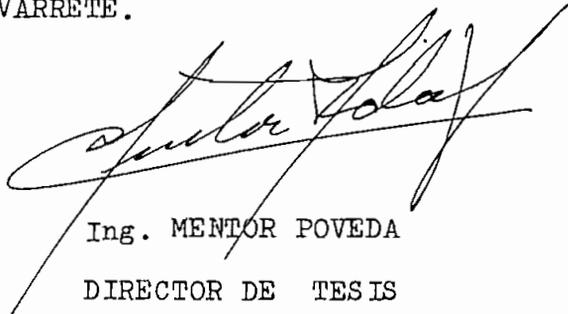
BYRON MUÑOZ NAVARRETE

Julio de 1.979

Quito

\* \* \*

Certifico que el presente trabajo  
de Tesis ha sido realizado en su  
totalidad por el señor BYRON MUÑOZ  
NAVARRETE.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Mentor Poveda", is written over the typed name. The signature is stylized and somewhat cursive.

Ing. MENTOR POVEDA

DIRECTOR DE TESIS

## A G R A D E C I M I E N T O

Quiero expresar mi agradecimiento, al señor Ingeniero MENTOR POVEDA, por haber hecho posible la realización del presente trabajo, mediante su guía desinteresada y acertadas indicaciones y sugerencias.

Agradezco también a un buen compañero, PABLO ANGULO, por haber prestado su - valiosa ayuda en la realización de la parte experimental; a mi compañero de trabajo, RAMIRO PAZMIÑO, por haber co- laborado en la elaboración de los dibu jos; y a todas las personas que han - contribuido para la mejor consecución de la presente tesis.

## INDICE

TEMA: "AUTOEXCITACION DE LA MAQUINA SINCRONICA

<u>Contenido:</u>	<u>Páginas:</u>
INTRODUCCION .....	1
 <u>CAPITULO PRIMERO</u>	
MAQUINA SINCRONICA .....	4
1.1.- Justificación .....	4
1.2.- Su constitución .....	4
1.3.- Principio de funcionamiento como motor y generador .....	7
1.4.- El sistema inductor y su excitación .....	11
1.5.- Devanados de inducido .....	14
1.6.- Torque y Potencia .....	15
1.7.- Ecuaciones de la máquina sincrónica en los ejes qdo .....	19
 <u>CAPITULO SEGUNDO</u>	
ANALISIS DE LA PERDIDA DE EXCITACION.....	30
2.1.- Introducción .....	30

<u>Contenido:</u>	<u>Páginas:</u>
2.2.- Estudio matemático del autoexcitado sincrónico de una máquina sincrónica	32
2.3.- Alcance teórico del autoexcitado asíncrónico de una máquina sincrónica ...	42
 <u>CAPITULO TERCERO</u>	
RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	62
3.1.- Descripción de los experimentos .....	63
3.2.- Resultados obtenidos .....	67
 <u>CAPITULO CUARTO</u>	
DETECCION Y PROTECCION CONTRA PERDIDA DE EXCITACION .....	89
4.1.- Introducción .....	89
4.2.- Propósitos de la protección .....	89
4.3.- Forma de detección .....	89
4.4.- Método de protección .....	94
 <u>CAPITULO QUINTO</u>	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	98
BIBLIOGRAFIA .....	103

## INTRODUCCION

Como es de conocimiento general, el incremento de la industria ha traído consigo una mayor demanda de energía eléctrica y es así como para atender esta demanda creciente, se ha desarrollado una tecnología que ha hecho posible la utilización de grandes centros potenciales de generación, los mismos que por lo general están ubicados fuera de los centros de consumo.

Para la utilización de estos centros se han empleado unidades de gran capacidad de generación, de ahí que todos los convertidores electromecánicos de energía, es la máquina síncrona la más importante, no sólo porque la casi totalidad de la energía eléctrica que se consume procede de este tipo de máquina, sino porque es también la que mayores potencias unitarias ha alcanzado.

Por lo expuesto en el párrafo anterior, el estudio de la pérdida de excitación en la máquina síncrona es importante, por cuanto la falta de campo en una máquina síncrona acarrearía serias dificultades como pérdida de estabilidad del sistema, daños, en otros equipos, salidas de grandes zonas de consumo, etc. de ahí que una de las preocupaciones más grandes de los Ingenieros Eléctricos es la de mantener la unidad en óptimas condiciones

(ca)

de servicio. Atendiendo a esta preocupación, un grupo de Ingenieros de ECAR, ante el hecho de que durante el 9 de noviembre de 1.965 se produjo la interrupción nor-occidental Michigan y más tarde la interrupción de 5 de junio de 1.967, interrupciones que trajeron como consecuencia la salida, de 38 unidades generadoras por daño, comenzaron a investigar y como resultado de estos estudios se sacó la conclusión de que todas menos una de estas salidas de generadores eran explicables; pero a pesar de esto se llegaron a tener serias dudas y en vista de esto se creó la necesidad de un estudio más concienzudo de los efectos que se presentan en una máquina sincrónica al perder su excitación y de ahí nació la necesidad de proveer a la máquina sincrónica de una adecuada protección que permitiera una seguridad en la detección de pérdida de excitación.

Al principio de los estudios se hizo aparente el hecho de que habían tres preguntas fundamentales que se debían responder antes de sacar conclusiones fundamentales.

Las preguntas que surgieron son:

- 1.- Puede un operador restaurar la excitación o sacar una máquina operando asincrónicamente, antes que ocurra un daño térmico en la máquina?

- 2.- Soportaría el sistema al cual la máquina está conectada los requerimientos de excitación de la máquina cuando ésta está operando asincrónicamente, sin causar depresión del voltaje del sistema a niveles bajos de operación? y,
- 3.- Pueden asegurarse los Relés de pérdida de excitación de falsas operaciones para cambios recobrables del sistema y reaccionar favorablemente a la verdadera pérdida de excitación?

A las preguntas presentadas anteriormente se dará contestación en el desarrollo de la tesis, mediante la recopilación de información en textos que tratan sobre el fenómeno.

## CAPITULO PRIMERO

### MAQUINA SINCRONICA

1.1.- JUSTIFICACION.- El Capitulo Primero ha sido concebido con dos propósitos, a saber:

- a) El primer propósito, es el de dar al lector de la Tesis, una idea física de la constitución y funcionamiento de la máquina sincrónica; y
- b) Que el lector pueda tener presente las ecuaciones que rigen el comportamiento de la máquina.

1.2.- SU CONSTITUCION.- (1)\* (2)\* Máquina sincrónica, es aquella máquina de corriente alterna, que al girar a una velocidad constante, transforma la energía mecánica en energía eléctrica y/o viciversa. La máquina sincrónica, no difiere en principio del generador de corriente continua, pues cualquier generador de DC. a excepción del generador unipolar, es en efecto un generador sincrónico, en el cual el voltaje alterno visto en la armadura es rectificado por medio de un conmutador.

La máquina sincrónica, como las demás máquinas rotativas, consta de un devanado, de inducido y un devanado inductor, concatenados por un campo magné

tico y, de acuerdo a la disposición de estos, la máquina puede ser:

- INDUCIDO GIRATORIO
- INDUCTOR GIRATORIO
- IMANES PERMANENTES

Para máquinas sincrónicas de gran potencia, el inducido se encuentra localizado en el estator, en tanto que el inductor está en el rotor, es decir, son máquinas de INDUCTOR GIRATORIO.

Para máquinas de potencia reducida, esto es, - hasta unos 5 KVA, la disposición es al revés, inducido en el rotor e inductor en el estator, en otras palabras, podremos decir, que se tratan de máquinas de INDUCIDO GIRATORIO.

La velocidad de giro del generador sincrónico, es proporcional a la frecuencia de la red, a la cual la máquina está conectada y esta dada por la siguiente expresión:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \text{ (r.p.m.)}$$

donde:

$n_1$  = velocidad de giro en revoluciones por minuto

$f_j$  = frecuencia en ciclos por segundo

$p$  = número de pares de polos.

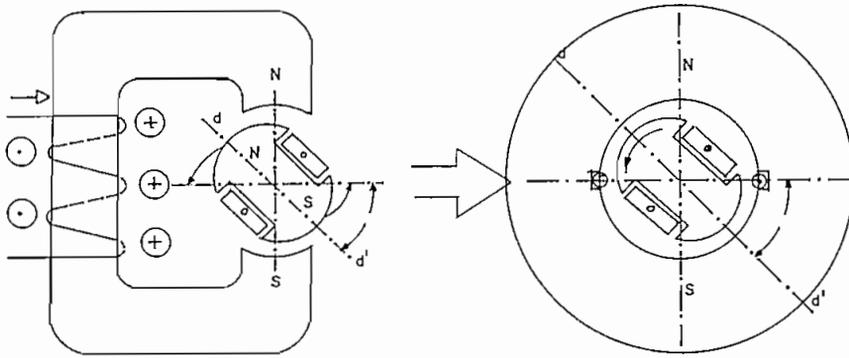
De la expresión anterior, se puede decir que:

- A mayor velocidad menor número de polos  
(GENERADORES MOVIDOS POR TURBINAS)
- A menor velocidad mayor número de polos  
(GENERADORES HIDRAULICOS)

Se ha dicho que el generador sincrónico, no difiere en principio del generador bipolar de corriente continua, ya que de esta podemos llegar a la máquina sincrónica elemental de inductor móvil, excitando el devanado del rotor con DC y cambiando el circuito magnético estatórico de herradura por una corona magnética, con dos ranuras longitudinalmente y diametralmente opuestas y en las que se aloja una bobina simple de  $N$  espiras (Fig. 1.01) (1)\*

Si en lugar de tener una bobina en la estructura del estator, disponemos de tres bobinas localizadas uniformemente y con un desplazamiento de  $120^\circ$  entre ejes de las bobinas, tendremos un generador sincrónico trifásico. (Fig. 1.02)

La máquina sincrónica, como las demás máquinas



(Fig. 1.01) Génesis de la Máquina Síncronica

rotativas son reversibles, puesto que pueden funcionar tanto como alternadores o como motores. Como alternador, la máquina síncronica ha alcanzado gran aplicación, y es así como más del 90% de la energía eléctrica generada se consigue con el alternador síncronico.

1.3.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO COMO ALTERNADOR Y COMO MOTOR (3)\* (4)\*

Como se ha dicho anteriormente, la máquina síncronica puede funcionar tanto como generador o como motor y las condiciones de uno u otro trabajo, así como las diferencias de funcionamiento se exponen a continuación.

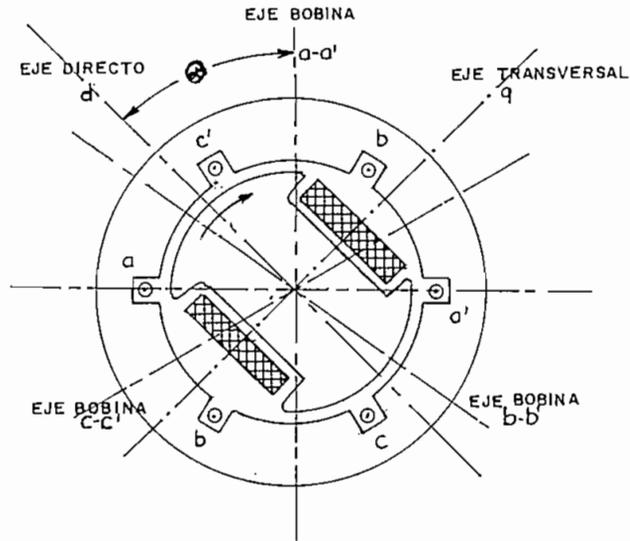


Figura 1.02 Máquina sincrónica trifásica

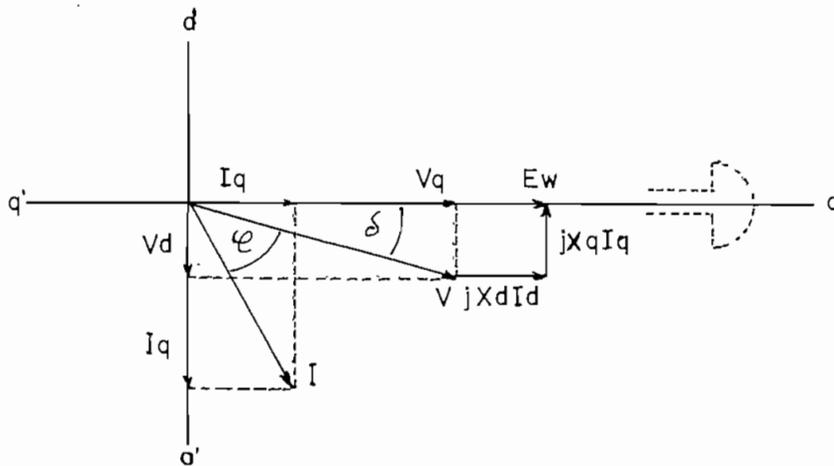


Figura 1.03 Diagrama fasorial con  $r_s = 0$   
para una máquina de polos salientes

1.3.1.- FUNCIONAMIENTO COMO ALTERNADOR.- Como se ha establecido, el alternador trifásico consta de un estator con arrollamiento trifásicos y, un rotor excitado por corriente continua. El generador sincrónico necesariamente tiene que ser movido por un motor, - turbina de vapor, etc. Para poner en marcha un alternador, se le suele llevar primero con el motor, hasta cierta velocidad, y luego se excita lentamente el rotor con corriente continua.

Al excitar la máquina sincrónica con corriente continua, se establece una f.m.m., un campo magnético giratorio, el mismo que inducirá en cada uno de los arrollamientos estáticos, una tensión alterna.

La conexión más común en los generadores trifásicos sincrónicos es la conexión en estrella, ya que esta conexión a más de proporcionarnos un punto neutro, disminuyen los armónicos de la tensión inducida.

1.3.2.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO COMO MOTOR (3) \* (4) \*

Si la máquina eléctrica recibe energía eléctrica de una red trifásica, en lugar de energía

mecánica, la máquina se transforma en motor, pudiendo accionar cualquier máquina acoplada a ella.

El funcionamiento del motor es como sigue:

Cuando se cierra el interruptor de la red que alimenta a la máquina, la corriente empieza a circular por los devanados del estator, esta corriente produce una f.m.m. y éste a su vez, genera un campo magnético giratorio, que gira a la velocidad sincrónica, e induce en el arrollamiento amortiguador del rotor una corriente, la misma - que nos determina una nueva f.m.m., originaria de otro campo. La acción conjunta del campo giratorio y del campo debido a la corriente rotórica, - determina un par de giro. Este par de giro arrastra al rotor en el sentido del campo giratorio, comunicándole una velocidad muy próxima a la sincrónica. A esta velocidad se excitan las bobinas del campo del rotor con corriente continua, determinándose sobre el rotor polos magnéticos definidos, los mismos que tienden a situarse frente a los giratorios del estator de polaridad contraria, incrementándose la velocidad hasta - que el rotor alcanza el sincronismo (3)\* (4)\*

En resumen, en las máquinas sincrónicas, el -

flujo de energía determina el funcionamiento como motor o como generador. Si la f.e.m.,  $E_w$ , avanza en el tiempo respecto a la tensión en bornes, la máquina sincrónica funciona como generador y si se retrasa como motor. El ángulo de adelanto o de retraso viene dado por el ángulo de par  $\delta$ .

Las f.m.m. del inducido y del inductor son estacionarias entre sí y al combinarse producen un par que tiende a mantener el rotor a la velocidad del sincronismo.

1.4.- EL SISTEMA INDUCTOR Y SU EXCITACION.- Las bobinas del rotor de una máquina sincrónica, se devanan de igual manera que las bobinas de campo de una máquina de corriente continua. De esta manera los arrollamientos del rotor forman un número determinado de polos de campo conectados en serie para crear polaridades alternadas. La alimentación con corriente continua a estos devanados se lo hace por dos terminales sacados al exterior y que se conectan a los anillos de toma apoyados a ellos (contactos deslizantes).

Para conseguir la resistencia mecánica necesaria,

el rotor está compuesto de piezas de acero forjado, en principio se puede decir que no es necesario - construir el rotor de chapas de acero, ya que el - campo creado por la corriente de excitación es prácticamente constante y no da lugar a corrientes parásitas.

La construcción de los rotores está sujeta a la velocidad de la máquina sincrónica. En efecto, para turbogeneradores, los rotores son cilíndricos y están constituidos por un cilindro macizo, en cuyo interior va a estar localizado el devanado inductor, gracias a que el cilindro posee en su periferia ranuras fresadas.

En los hidrogeneradores, el rotor es de polos - salientes y estos no tienen las características de resistencias mecánica de los anteriores.

Cabe anotar que en el generador de rotor cilíndrico, la reluctancia del circuito magnético, es - prácticamente constante, puesto que el entre-hierro es uniforme en toda la periferia de la máquina. Es to no sucede en las máquinas de polos salientes, - puesto que la reluctancia de los espacios interpolares es muy superior a lo que ofrece el circuito magnético bajo los polos. (5)\*

Cuando los polos salientes de un alternador son de planchas de acero, estos a menudo están provistos de un devanado amortiguador, constituido por barras de cobre, algunas veces de bronce que se encuentran localizadas en el cuerpo del rotor y en lo posible lo más próximas al entrehierro. Estas barras van unidas por sus extremos, por anillos de cobre, formando un devanado de jaula de ardilla similar al de la máquina de INDUCCION.

El empleo del devanado de amortiguamiento permite:

- Reducir los armónicos de la tensión, producido por las corrientes que circulan en el estator. El devanado amortiguador se opone a la presencia de cualquier campo que no gire en sincronismo con el inductor.
- Amortiguar las oscilaciones pendulares, mediante la introducción de un par de inducción, en consecuencia, el devanado amortiguador se opone a cualquier acción que tienda a alterar el sincronismo.
- Se opone a la variación brusca del campo principal del inducido durante los períodos transitorios.

La excitación de la máquina sincrónica se consigue mediante:

- Una excitatriz de c.c., localizada en el eje de la máquina sincrónica, y movida por un motor eléctrico. Para lograr una regulación más fina y amplia se suele tener acoplada a la excitatriz una EXCITATRIZ PILOTO.
- El empleo de un sistema totalmente estático de rectificadores, la c.c. necesaria para la excitación se obtiene rectificando la f.e.m. alterna de la máquina y esto se hace gracias al magnetismo remanente de la máquina.
- La excitatriz de corriente alterna de armadura estática, mediante la rectificación de la corriente alterna producida en este alternador. (6)\*

1.5.- DEVANADOS DE INDUCIDO.- La construcción del estator en las máquinas sincrónicas es similar a la máquina de inducción, por cuanto en las dos máquinas circularan análogas corrientes por los devanados respectivos.

La distribución senoidal de la onda de flujo a través del entrehierro se consigue fácilmente cor-

tando las expansiones polares en forma adecuada.

#### 1.6.- TORQUE Y POTENCIA (7)\*

La potencia de una máquina sincrónica es igual, a la potencia generada, en el caso de funcionar la máquina como generador, o a la potencia absorbida, cuando la máquina funciona como motor.

Cuando la máquina sincrónica funciona conectada a una red, es preferible expresar la potencia en función de magnitudes que nos indiquen la influencia de la red, sobre el funcionamiento de la máquina. Dichas magnitudes son: la tensión en bornes, la f.e.m. de vacío  $E_w$  y el ángulo de par  $\delta$ .

Las expresiones tanto para la Potencia Activa y reactiva de la máquina sincrónica, se encontraran a partir de considerar que:

- La máquina es de Polos Salientes, y que su diagrama fasorial para resistencia del estator despreciable es el que se da a continuación. (Fig. 1.03)

De la Fig. 1.03 podemos decir que:

$$E_w = V \cos \delta + I_d x_d$$

$$0 = V \sin \delta - X_q I_q$$

$$I_d = \frac{E_w - V \cos \delta}{x_d} \quad (1.01)$$

$$I_q = \frac{V \sin \delta}{x_q} \quad (1.02)$$

Ahora bien, si consideramos al eje dd' como imaginario y al eje qq' como real, y si descomponemos V e I en sus dos componentes tendremos que:

$$V = V \cos \delta - j V \sin \delta \quad (1.03)$$

$$I = I_q - j I_d \quad (1.04)$$

Valiéndonos de la definición de Potencia aparente y reemplazando las expresiones (1.03 y 1.04) en ella y agrupando términos, llegaremos a las expresiones de Potencia activa y reactiva.

En efecto:

$$S = m V^* I \quad (1.05)$$

donde:  $V^*$  es el complejo conjugado de V. y

m es el número de fases.

Reemplazando (1.03) y (1.04) tendremos:

$$S = m(V \cos \delta + jV \sin \delta) (I_q - jI_d)$$

$$S = m(V I_q \cos \delta + jV I_q \sin \delta) - mj(V I_d \cos \delta - V I_q \sin \delta)$$

$$S = P + jQ$$

$$\Rightarrow P = m(V I_q \cos \delta + jV I_q \sin \delta) \quad (1.06)$$

$$Q = -mj(V I_d \cos \delta - V I_q \sin \delta) \quad (1.07)$$

Sustituyendo (1.01) y (1.02) en (1.06) y (1.07) y simplificando, llegaremos a las expresiones siguientes:

$$P = \frac{mEwV}{x_d} \sin \delta + mV^2 \frac{(x_d - x_q)}{2x_d x_q} \sin 2\delta \quad (1.08)$$

$$Q = \frac{mEwV}{x_d} \cos \delta - mV^2 \left( \frac{\cos^2 \delta}{x_d} + \frac{\sin^2 \delta}{x_q} \right) \quad (1.09)$$

En el caso de que la máquina sincrónica sea de rotor cilíndrico, la expresión (1.08) se reduce al primer término, puesto que  $x_d = x_q$ , para este tipo de máquinas. Lo que pone de manifiesto que la Potencia es superior en el caso de ser la máquina de polos salientes.

Al despreciar la resistencia del estator, la potencia electromagnética interna ( $P_i$ ) será igual a la potencia en bornes ( $P$ ) y en base a esto, el par electromagnético en la máquina de polos salientes vendrá dado por:

$$T = \frac{P}{\omega_m} = \frac{mE\omega V}{\omega_m x_d} \sin \delta + \frac{mV^2}{2\omega_m} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\delta \quad (1.10)$$

Como podemos ver la expresión (1.10) tiene dos componentes, a saber:

Una fundamental ( $T_e$ )

$$T_e = \frac{mE\omega V}{\omega_m x_d} \sin \delta \quad (1.11)$$

y otro adicional denominado par de Reluctancia ( $T_r$ )

$$T_r = \frac{mV^2}{2\omega_m} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\delta \quad (1.12)$$

Esta última expresión nos dice que el par de Reluctancia es independiente de la f.e.m. de excitación ( $E\omega$ ), y es el que nos daría la máquina sincrónica funcionando sin excitación alguna.

Resumiendo diríamos que de las dos componentes de la Potencia cuantitativamente, la primera tiene más importancia, en tanto que la segunda introduce el efecto de polos salientes y representa el hecho físico de que la onda de flujo en el entrehierro produce un par que tiende a alinear los polos en la posición de mínima reluctancia.

En la máquina sincrónica de rotor cilíndrico, el par de reluctancia no existe puesto que  $x_d = x_q$ .

Para una máquina normalmente excitada, el efecto de los polos salientes representa un pequeñísimo porcentaje de aumento de la potencia.

1.7.- ECUACIONES DE LA MAQUINA SINCRONICA EN LOS EJES  $q$ .  
 $d, 0. - (6)* (8)* (9)*$

La teoría clásica de la máquina sincrónica, - presenta un análisis de la máquina en términos de flujo, corriente y ondas f.e.m, a través del entrehierro.

Esta teoría si bien se acerca a las realidades físicas dentro de la máquina, es impráctica para - exponer el comportamiento de la máquina en condiciones transitorias, para este propósito se ha hecho necesario recurrir a un método bastante poderoso, basado en el concepto del circuito magnético - acoplado.

En efecto, este método considera a la máquina sincrónica como un circuito magnético acoplado cuyos parámetros principales varían con respecto al tiempo.

La máquina representada en la fig. (1.02) está

compuesta de cuatro bobinados, tres de los cuales están localizados simétricamente en el estator, y representados con los símbolos a, b y c. El bobinado restante se localiza en el rotor. (r)

Antes de seguir con la deducción de las fórmulas que nos demuestren el comportamiento de la máquina, es necesario hacer las siguientes consideraciones:

- No se toma en cuenta la influencia de los devanados de damping.
- Cada uno de los bobinados se caracteriza por tener, resistencia, inductancias propias, inductancias mutuas respecto a cada uno de los otros bobinados.
- Se asume que la máquina es magnéticamente lineal.
- Que las resistencias del estator  $r_a$ ,  $r_b$  y  $r_c$ , son iguales y de pequeña magnitud, esto es:

$$r_a = r_b = r_c \triangleq r_s$$

- Que todos los elementos de inductancia, a excepción de la inductancia del rotor ( $L_f$ ) dependen de la posición del rotor y son funciones del ángulo  $\theta$ , definido en la fig. (1.02)
- Que la inductancia propia del devanado a ( $L_{aa}$ )

varía periódicamente con la posición del ángulo  $\theta$ , como podemos observar en la fig. (x) . Dicha variación es considerada armónica, con lo que se puede escribir  $L_{as}$  de la siguiente manera:

$$L_{as} = L_A + L_B \cos 2 \theta$$

Ahora bien, como los devanados b y c, se encuentran desplazados de  $\underline{a}$  120 y 240 grados respectivamente, podemos escribir:

$$L_{bs} = L_A + L_B \cos 2 \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$L_{cs} = L_A + L_B \cos 2 \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right)$$

- Las inductancias mutuas  $L_{ij}$  y  $L_{ji}$ , son iguales, y las inductancias  $L_{as}$ ,  $L_{cs}$ ,  $L_{bs}$ , son todas negativas, por cuanto los flujos por dos bobinas se oponen.
- El flujo concatenado en el devanado b, por la corriente que circula en el devanado a, tendrá mayor magnitud cuando el ángulo  $\theta$  del rotor, esta en  $-30^\circ$  o  $+150^\circ$  fig. ( y ). De la misma manera el flujo sería mínimo para  $\theta = 60$  o  $240$  grados. De estas dos posiciones el rotor ofrece las siguientes reluctancias magnéticas.

$$L_{bs} = -L_A - L_B \cos 2 \left( \theta + \frac{\pi}{6} \right)$$

$$L_{bscs} = -L_A - L_B \cos 2 \left( \theta - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$L_{ascs} = -L_A - L_B \cos 2 \left( \theta - \frac{\pi}{6} \right)$$

Las inductancias mutuas entre el rotor y los devanados del estator, varían entre dos máximos, uno positivo y otro negativo. Figura (W) Teniendo en cuenta que un ciclo corresponde a 360 grados de la posición del rotor podemos escribir que:

$$L_{sf} = L_{sf} \cos \theta$$

$$L_{bsf} = L_{sf} \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$L_{csf} = L_{sf} \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) = L_{sf} \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$L_{ff} = L_{ff} + L_{mf}$$

donde  $L_{lf}$  queda definida en la figura (Z)

Una vez conocidos todos los parámetros de la máquina sincrónica y partiendo de la figura (1.04) podemos sacar las ecuaciones de la máquina sincrónica, así: (Ver figura 1.04)

$$V_{as} = i_{as} r_s + p \lambda_{as} \quad \lambda_{as} = i_{as} L_{asas} + i_{bs} L_{asbs} + i_{cs} L_{ascs} + i_f L_{asf}$$

$$V_{bs} = i_{bs} r_s + p \lambda_{bs} \quad \lambda_{bs} = i_{as} L_{bsas} + i_{bs} L_{bsbs} + i_{cs} L_{bscs} + i_f L_{bsf}$$

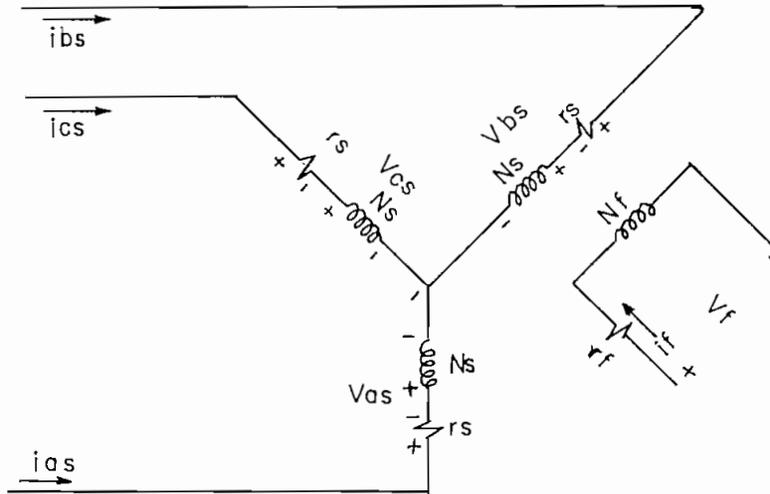


Figura (1.04) Máquina Sincrónica trabajando como motor.

$$V_{cs} = i_{cs}r_s + p \lambda_{cs} \therefore \lambda_{cs} = i_{as}L_{csas} + i_{bs}L_{csbs} + i_{cs}L_{cscs} + i_f L_{csf}$$

$$V_f = i_f r_f + p \lambda_f \therefore \lambda_f = i_{as}L_{fas} + i_{bs}L_{fbs} + i_{cs}L_{fcs} + i_f L_{ff}$$

Tomando en cuenta las consideraciones mencionadas anteriormente, podemos expresar los 16 elementos de inductancias de las ecuaciones escritas, en términos de cinco parámetros de inductancias.

$L_{sas} \dots L_{sf}$ , todos ellos descritos en la figura (Z) y son funciones del ángulo  $\theta$  que determina la posición del rotor. (7)\*

Las ecuaciones diferenciales presentadas no tienen parámetros constantes y consecuentemente para

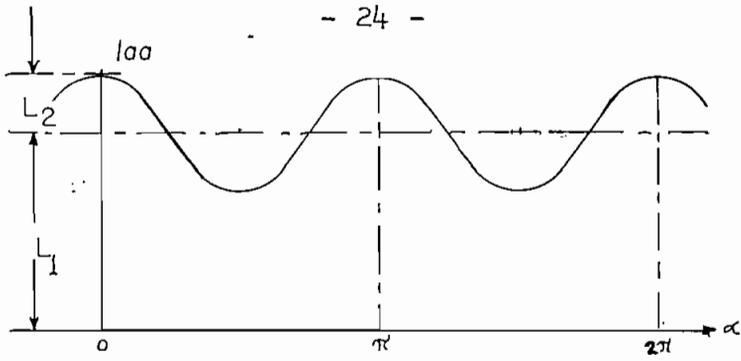


Figura X

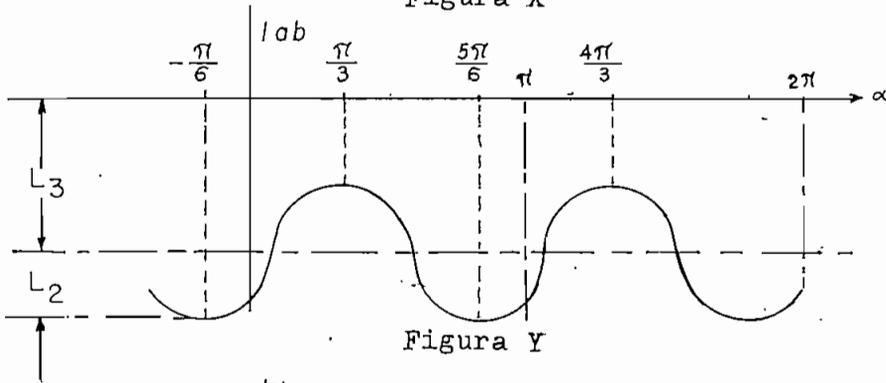


Figura Y

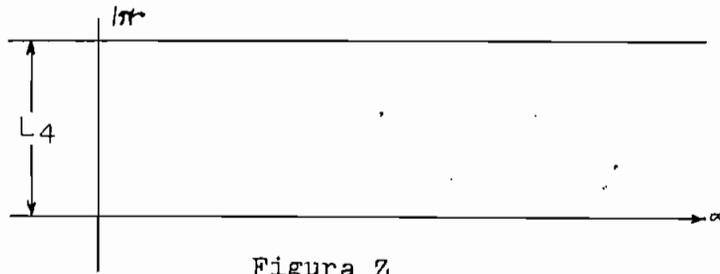


Figura Z

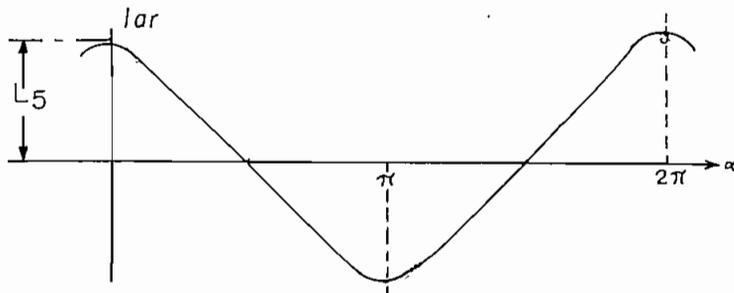


Figura W

1.05 Variación de los parámetros de inductancia con la posición angular del rotor.

hallar la solución de las mismas, no se puede usar directamente la transformada de Laplace.

Para simplificar las ecuaciones anteriores, en el año de 1.929, Park introdujo la transformación a la referencia del rotor, dicha transformación no es más que un sistema de análisis que trata de establecer un cambio de variables, estableciendo referencia en el rotor. (8)\*

La transformación de Park esta dada por:

$$f_{qs} = \frac{2}{3} \left[ f_{as} \cos \theta_r + f_{bs} \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) + f_{cs} \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \right]$$

$$f_{ds} = \frac{2}{3} \left[ f_{as} \sin \theta_r + f_{bs} \sin \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) + f_{cs} \sin \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \right]$$

$$f_{os} = \frac{1}{3} \left[ f_{as} + f_{bs} + f_{cs} \right]$$

En donde:

f<sub>as</sub> representa cualquier variable:  $\begin{matrix} V_{as} \\ i_{as} \\ \lambda_{as} \end{matrix}$

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r dt + \theta_r(0) \quad \text{desplazamiento angular del rotor}$$

1.7.1.- ECUACIONES DE LA MAQUINA EN LOS EJES q.d.0 (6)\*

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} + \lambda_{ds} \frac{d\theta_r}{dt}, \quad \lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + \frac{3}{2} (L_A - L_B) i_{qs}$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} - \lambda_{qs} \frac{d\theta_r}{dt}, \quad \lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + \frac{3}{2} (L_A + L_B) i_{ds} + L_s f_{ids}$$

$$V_{os} = r_{sios} + \frac{d\lambda_{os}}{dt} \quad \therefore \quad \lambda_{os} = L_{lsios}$$

$$V_f = r_{fif} + \frac{d\lambda_f}{dt} \quad \therefore \quad \lambda_f = L_{lf} + L_{mfif} + \frac{3}{2} L_{sfids}$$

Por definición:

$$L_{mq} = \frac{3}{2} (L_A - L_B)$$

$$L_{md} = \frac{3}{2} (L_A + L_B)$$

$$L_{sf} = \left(\frac{N_f}{N_s}\right) \frac{2}{3} L_{md}$$

$$L_{mf} = \left(\frac{N_f}{N_s}\right)^2 \left(\frac{2}{3}\right) L_{md}$$

Para poder reducir todas las variables o los de vanados del estator, tenemos que considerar que:

$$i_f' = \frac{2}{3} \left(\frac{N_f}{N_s}\right) i_f \quad L_{lf}' = \frac{3}{2} \left(\frac{N_s}{N_f}\right)^2 L_{lf}$$

$$v_f' = \frac{2}{3} \left(\frac{N_s}{N_f}\right) V_f \quad r_{f}' = \frac{3}{2} \left(\frac{N_s}{N_f}\right)^2 r_f$$

$$\lambda_{f}' = \frac{2}{3} \left(\frac{N_s}{N_f}\right) \lambda_f$$

Sustituyendo las consideraciones expuestas anteriormente, podemos escribir las ecuaciones de la máquina sincrónica de la siguiente manera:

$$V_{qs} = r_{siqs} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} + \lambda_{ds} \quad \frac{d}{dt} \Theta_r$$

$$V_{ds} = r_{sids} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} - \lambda_{qs} \approx \frac{d}{dt} \Theta_r$$

$$\lambda_{os} = r_{sios} + \frac{d}{dt} \lambda_{os}$$

$$V_{f'} = r_{f'} i_{f'} + \frac{d}{dt} \lambda_{f'}$$

Donde:

$$\begin{aligned} \lambda_{qs} &= L_{lsiqs} + L_{mqiqs} \\ \lambda_{ds} &= L_{lsids} + L_{md} (ids + if') \\ \lambda_{os} &= L_{lsios} \\ \lambda_{f'} &= L_{lfif'} + L_{md} (ids + if') \end{aligned}$$

### ESTADO ESTABLE DE LA MAQUINA SINCRONICA

En este estado se debe considerar que para que  $i_{qs}$ ,  $i_{ds}$ ,  $i_{f'}$ , sean constante, los voltajes, deben ser constantes, esto es  $v_{ds}$ ,  $v_{qs}$ ,  $v_{os}$ , y como consecuencia, de esto  $\delta$  debe ser constante, ya que  $\omega_r = \omega_e$ .

En las ecuaciones generales de la máquina sincrónica, se debe considerar que:  $\frac{d}{dt} \lambda_{qs}$ ,  $\frac{d}{dt} \lambda_{ds}$ ,  $\frac{d}{dt} \lambda_{f'}$   $v_{os}$ , son iguales a cero, entonces las ecuaciones de la máquina sincrónica se transforma en:

$$V_{qs} = r_s I_{qs} + \omega_e (L_{ls} I_{ds} + L_{md} I_{ds} + L_{md} I_{f'})$$

$$V_{ds} = r_s I_{ds} - \omega_e (L_{ls} I_{qs} + L_{mq} I_{qs})$$

$$V_f' = r_f' I_f'$$

Si consideramos que:

$$\begin{aligned} L_{ls} + L_{mq} &= L_q & \omega_e L_q &= X_q \\ L_{ls} + L_{md} &= L_d & \omega_e L_d &= X_d \\ & & \omega_e L_{md} &= X_{md} \end{aligned}$$

$$V_{qs} = r_s I_{qs} + x_d I_{ds} + x_{md} I_f'$$

$$V_{ds} = r_s I_{ds} - x_q I_{qs}$$

$$V_f' = r_f' I_f'$$

Escribiendo en forma fasorial, tenemos:

$$\dot{F}_s e^{-j\delta} = F_{qs} - jF_{ds}$$

$$\text{En donde: } F_s = \frac{V}{I}$$

$$\dot{V}_s e^{-j\delta} = V_{qs} - jV_{ds}$$

Y reemplazando  $V_{qs}$  y  $V_{ds}$  y haciendo arreglos, podemos llegar a lo siguiente:

$$\dot{V}_s = (r_s + jX_q) \dot{I}_s + \dot{E}_w$$

donde  $E_w$  viene dado por:

$$\dot{E}_w = \left[ (X_d - X_q) I_{ds} + X_{md} I_f' \right] e^{j\delta}$$

La expresión anterior nos conduce al siguiente circuito equivalente de la máquina sincrónica.

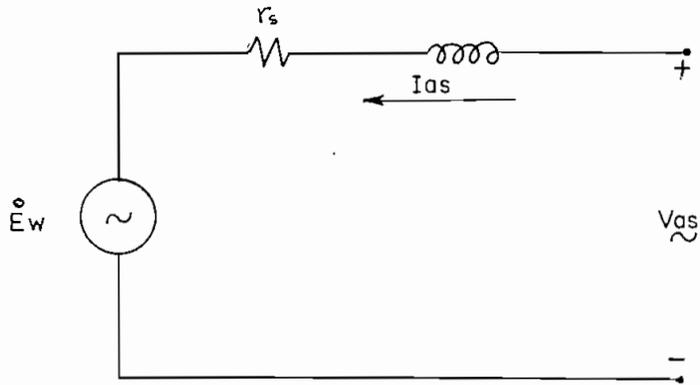


Figura 1.06 Circuito equivalente de la máquina sincrónica.

CAPITULO SEGUNDO

2.1.- INTRODUCCION.- Cuando una máquina sincrónica, pierde su excitación, ésta puede seguir funcionando, entregando una cierta potencia activa, a este fenómeno se le conoce con el nombre de auto-excitación de la máquina sincrónica (Autocebado)

Para que el fenómeno ocurra, es necesario que:

- El circuito magnético de la máquina debe ser excitado previamente, y
- La carga conectada a la máquina debe ser de factor de potencia capacitivo.

El autocebado de la máquina sincrónica puede ser:

- Sincrónico, esto es, funcionando la máquina a la velocidad de sincronismo como un alternador independiente, y
- Asincrónico, o sea, la máquina funcionando asincrónicamente como un generador de inducción y con una velocidad superior a la del campo giratorio.

Para que se produzca el autocebado asincrónico

de la máquina sincrónica, ésta debe estar provista de devanados de amortiguamiento, ser de polos salientes y que la carga capacitiva, C, conectada al neutro sea por lo menos igual al valor que corresponde a la resonancia con la inductancia sincrónica no saturada de la máquina ( $L_s$ )

$$C = \frac{1}{2 \omega_1 L_s}$$

donde  $\omega_1$ , es la velocidad sincrónica de la máquina y viene dada por:

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = \frac{2\pi p n_1}{60}$$

En donde p = pares de polos

Cuando la capacidad conectada a la máquina es mayor que el valor correspondiente al de la resonancia con la inductancia no saturada de la máquina, la tensión en bornes adquirirá valores mayores que el nominal, lo que implica que la máquina tendrá que saturarse para satisfacer la condición de resonancia.

Al saturarse la máquina se reduce el valor de su inductancia, o sea que, la inductancia saturada es menor que la inductancia no saturada de la máquina. ( $L_{ss} < L_s$ ) (1)\*

2.2.- ESTUDIO MATEMATICO DEL AUTOEXCITADO SINCRONICO DE UNA MAQUINA SINCRONICA (1)\*

Para comenzar el estudio partiremos del siguiente circuito:

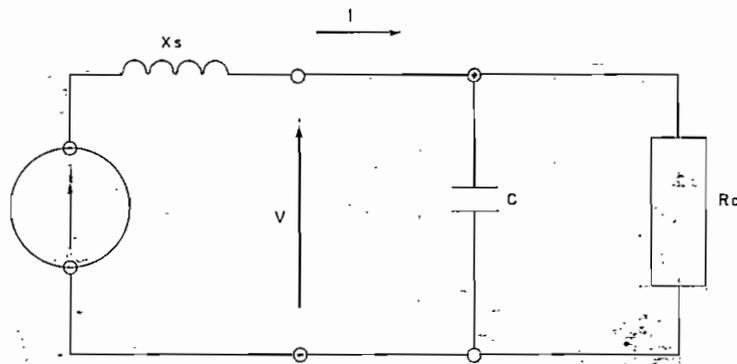


Fig. 2.01.-Autoexcitación de la Máquina Sincrónica

La figura 2.01, nos representa un alternador de rotor cilíndrico y resistencia ( $r_s$ ) despreciable, conectado a una carga compuesta por una resistencia y una capacitancia.

El diagrama del circuito anterior se representa en la fig. (2.02) así:

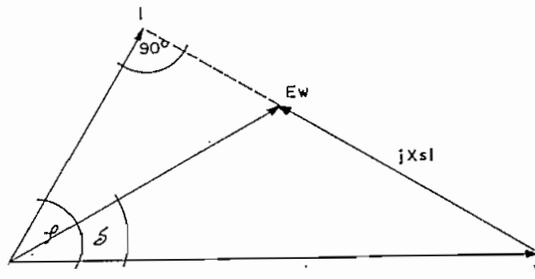


Fig. (2.02) Diagrama Fasorial

De la fig. (2.02) se deduce que:

- La corriente adelanta al voltaje terminal (V) en un ángulo  $\varphi$  comprendido entre 0 y  $\pi/2$
- La tensión interna de la máquina se encuentra en adelantó, respecto al voltaje terminal, en un ángulo  $\delta$  que también va a estar comprendido entre 0 y 90 grados.

$$\dot{E}_w = \dot{V} + j X_s \dot{I} \quad (2.01)$$

$$\dot{I} = \dot{V}/R_c + jCw\dot{V} \quad (2.02)$$

Reemplazando (2.02) en (2.01) tenemos:

$$\dot{E}_w = \dot{V} + j X_s (\dot{V}/R_c + jCw\dot{V})$$

$$\therefore X_s = jwL_s$$

$$\dot{E}_w = \dot{V} + jwL_s (\dot{V}/R_c + jCw\dot{V})$$

$$\dot{E}_w = \dot{V} ( 1 - w^2 L_s C + j \frac{w}{R_c} L_s )$$

$$|E_w| = V \sqrt{(1 - w^2 L_s C)^2 + \frac{w^2}{R_c^2} L_s^2} \quad (2,03)$$

La expresión 2,03 nos fija las condiciones requeridas para que se produzca la autoexcitación del generador sincrónico, esto es,  $E_0 = 0$ , cuando:

- Se cumple la condición de resonancia, esto es

$$w^2 L_s C = 1, \text{ y}$$

-  $R_c$  sea igual a  $\infty$

Cumplidas las condiciones anteriores, la máquina se autoexcita y posee una tensión en bornes, fijada por la saturación del circuito magnético.

Si la carga de la máquina se limitase a  $C$ , el resultado sería el siguiente:

El magnetismo remanente, lograría que en los devanados de la máquina se induzca una f.e.m., la misma que daría lugar a la circulación de una débil corriente por el condensador, corriente que se encontraría desfasada 90 grados en adelante, respecto a la tensión en bornes y a la f.e.m. La reacción de inducido de esta corriente será totalmente magnetizante, en consecuencia reforzará el campo magnético remanente, se aumenta la f.e.m.<sup>m</sup> inducida y ésta<sup>a</sup> a su vez, aumentará la corriente capacitiva y así sucesi-

vamente hasta lograr un equilibrio entre las tensiones de la máquina y de la capacidad.

Si trazamos las características, tanto de la carga capacitiva como de la máquina sin corriente de excitación, obtendremos las condiciones de funcionamiento de la máquina autoexcitada.

En efecto, la característica de la máquina quedará representada por la curva 1, en el gráfico (2.03) y la del condensador, por la recta o C, en el mismo dibujo.

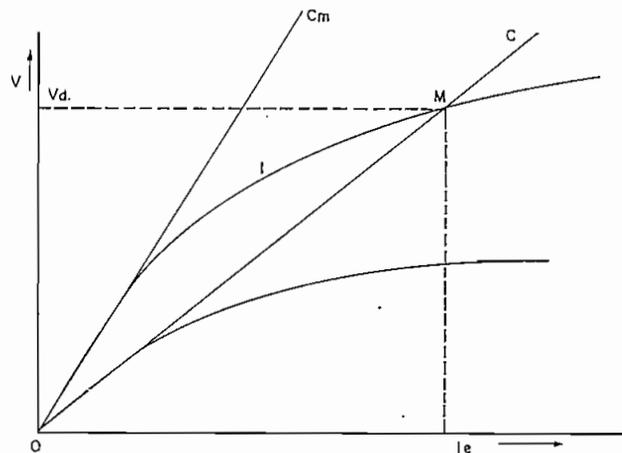


Fig. (2.03)

La característica del condensador se obtiene dibujando la siguiente expresión:

$$V = \frac{1}{\omega C} I_c$$

El corte de las dos curvas nos da el voltaje de funcionamiento de la máquina sincrónica, sin corriente de excitación.

Del gráfico anterior podemos sacar las siguientes conclusiones:

- Que la tensión  $V_a$ , es mayor cuando el coeficiente angular de la recta de capacidad es menor, esto se cumple cuando la capacidad exterior conectada a la máquina es mayor.
- Que existe un valor de  $C$  mínimo, por debajo del cual no es posible lograr la autoexcitación de la máquina. El valor de  $C$  mínimo viene dado por el coeficiente angular que corresponde a la tangente a la curva 1.

Matemáticamente el valor mínimo de  $C$  viene dado por la siguiente expresión:

$$W^2 C_m L_s = 1$$

Por razón del magnetismo remanente, la carga de capacidad corta siempre a la curva 1, pero si por alguna razón, la capacidad es inferior al valor señalado, la intersección tiene lugar por debajo del codo de saturación y la tensión de bornes, adquiere un valor reducido.

Cabe mencionar que el autocebado sincrónico de la máquina sincrónica de rotor cilíndrico, es posible sólo teóricamente, puesto que en la realidad, -rs por muy reducida que sea, nunca es igual a cero, y en consecuencia la f.e.m., resultante no se encontraría en fase con la f.m.m. de reacción de inducido magnetizante y como resultado la corriente I, no está defasada en 90 grados a la f.e.m. resultante, requiriéndose siempre de una pequeña corriente de - excitación.

En cambio, el autocebado de la máquina sincrónica de polos salientes, es factible siempre y cuando la capacidad conectada a la máquina, puede suministrar los requerimientos de excitación del circuito magnético.

En efecto, partiendo de las ecuaciones de Potencia Activa y reactiva de la máquina de polos salientes, esto es:

$$P = m \frac{E_o V}{x_d} \text{ Sen } \delta + m V^2 \frac{(X_d - x_q)}{2x_d x_q} \text{ Sen } 2\delta$$

$$Q = m \frac{E_o V}{x_d} \text{ Cos } \delta - m V^2 \left( \frac{\text{Cos}^2 \delta}{x_d} + \frac{\text{Sen}^2 \delta}{x_q} \right)$$

En las expresiones anteriores podemos notar que si  $E_o = 0$ , P y Q no se anulan, sino que gracias al

distinto valor de reactancias  $X_d$  y  $X_q$ , el generador puede seguir suministrando potencia activa:

$$P = mV^2 \frac{(X_d - X_q)}{2X_dX_q} \text{ Sen } 2\delta \quad (2.04)$$

Y potencia reactiva:

$$Q = -mV^2 \left( \frac{\text{Cos}^2\delta}{X_d} + \frac{\text{Sen}^2\delta}{X_q} \right) \quad (2.05)$$

La expresión (2.05) nos dice que  $Q$  es siempre negativa, cualquiera que sea el valor del ángulo de par  $\delta$ , esto implica necesariamente que se trata de una potencia que debe recibir del circuito conectado a la máquina; dicha potencia sólo puede ser cedida por el condensador que es preciso tener conectado a la máquina.

De la figura 2.01 se deduce que:

$$P = m \frac{V^2}{R_c} \quad (2.06)$$

$$Q = -mWCV^2 \quad (2.07)$$

Iguando (2.04 y 2.06) y (2.05 = 2.07) tenemos:

$$m \frac{V^2}{R_c} = m V^2 \times \frac{(X_d - X_q)}{2X_dX_q} \text{ Sen } 2\delta$$

$$R_c = \frac{2X_q X_d}{(X_d - X_q)} \operatorname{sen}^2 \delta \quad (2.08)$$

$$y \cancel{V}^2 W_c = \cancel{V}^2 \left( \frac{\cos^2 \delta}{X_d} + \frac{\operatorname{sen}^2 \delta}{X_q} \right) \cancel{V}^2$$

$$W_c = \frac{\cos^2 \delta}{X_d} + \frac{\operatorname{sen}^2 \delta}{X_q}$$

$$\text{si } \cos^2 \delta = 1 - \operatorname{sen}^2 \delta$$

$$y \operatorname{sen}^2 \delta = \frac{1}{2} (1 - \cos 2\delta)$$

$$C = \frac{1}{W} \left[ \frac{1}{X_d} + \frac{1}{2} (1 - \cos 2\delta) \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right] \quad (2.09)$$

De (2.08) se deduce que:

$$\operatorname{sen}^2 \delta = \frac{2X_q X_d}{(X_d - X_q) R_c}$$

De (2.09) tenemos que:

$$\cos 2\delta = \frac{\frac{1}{X_q} - \frac{2CW}{X_d} + \frac{1}{X_d}}{\left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)}$$

Para que exista solución es necesaria:

$$\operatorname{sen}^2 \delta + \cos^2 2\delta = 1$$

$$\left[ \frac{2}{R_c \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)} \right]^2 + \left[ \frac{\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} - 2CW}{\left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)} \right]^2 = 1$$

Para facilitar el desarrollo haremos:

$$\frac{1}{Rc} = a \quad \frac{1}{Xq} = b \quad \text{y} \quad \frac{1}{Xd} = e$$

$$\Rightarrow \frac{4a^2}{(b-e)^2} + \frac{[(b+e) - 2CW]^2}{(b-e)^2} = 1$$

$$4a^2 + b^2 + e^2 + 2be - 2(2CW)(b+e) + 4\overline{CW}^2 = (b-e)^2$$

$$4a^2 + b^2 + e^2 + 4\overline{CW}^2 - 4CW(b+e) + 4be = b^2 + e^2$$

$$a^2 + \overline{CW}^2 - 4(b+e)CW + be = 0$$

$$a^2 = - \left[ \overline{CW}^2 - 4(b+e)CW + be \right]$$

$$a^2 = - (CW - b)(CW - e) =$$

$$\frac{1}{Rc} = \sqrt{\left(CW - \frac{1}{Xd}\right) \cdot \left(\frac{1}{Xq} - CW\right)} \quad (2.09)$$

De 2.09 se deduce que:

$$\frac{1}{Xd} < CW < \frac{1}{Xq}$$

Condiciones que fijan las posibilidades de auto  
cebado de la máquina sincrónica de polos salientes.

En conclusión, la máquina de polos salientes -  
funciona sin corriente de excitación, cuando la sus

ceptancia de la carga capacitiva este comprendida - entre las admitancias sincrónicas en eje directo y en cuadratura de la máquina.

Para un valor fijo de tensión, la potencia suministrada será máxima cuando  $R_c$  sea mínima. El valor mínimo de  $R_c$  se encuentra derivando la expresión (2.09) con respecto a  $C$  e igualando a cero.

Así:

$$\frac{d R_c}{d C} = - \frac{1}{2} \left[ \left( cW - \frac{1}{X_d} \right) \left( \frac{1}{X_q} - cW \right) \right]^{-\frac{3}{2}} \left[ W \left( \frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) - 2cW^2 \right]$$

$$0 = W \left( \frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) - 2cW^2$$

$$c = \frac{1}{2W} \left( \frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right)$$

Este valor de  $C$ , reemplazado en 2.09 nos da  $R_c$ , - mínimo, así:

$$\frac{1}{R_c} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)}$$

$$R_c = \frac{2X_q X_d}{X_d - X_q}$$

Y este valor de  $R_c$  nos da la Potencia Máxima, reemplazado en (2.06)

$$P. \text{ máxima} = \frac{mV^2}{2} \left( \frac{1}{xq} - \frac{1}{xd} \right) \quad (2.08)$$

P. máxima se reduce al aumentar la saturación de la máquina y corresponde al valor de Potencia, debida al par de reluctancia, el mismo que está dado por el segundo término de la expresión (1,04)

En la práctica, la autoexcitación del generador sincrónico puede presentarse al conectar una línea en vacío, y consecuentemente se debe escoger el generador adecuado, para que la capacidad de la línea no de lugar a la autoexcitación del mismo.

2.3.- ALCANCE TEORICO DE LA AUTOEXCITACION ASINCRONICA DE UNA MAQUINA SINCRONICA.- Sea un generador conectado

a un sistema eléctrico de Potencia, que está entregando Potencia activa y reactiva, es decir, está funcionando normalmente y de pronto ocurre en el generador una pérdida de excitación, lo que motiva o produce una respuesta, y precisamente esta respuesta es la que se detalla a continuación:

La pérdida de excitación, puede producirse ya sea por un defecto en el circuito de excitación del gene

rador o por desacoplamiento entre el rotor y la excitatriz o por cualquiera otras razones; como consecuencia de la pérdida de excitación el generador pasa a trabajar en un régimen asincrónico y como tal, a medida que disminuye el flujo magnético, originado anteriormente por la corriente en el devanado del rotor, el generador comienza a consumir energía reactiva del sistema. Se interrumpe el equilibrio, existente hasta entonces y comienza a crecer la frecuencia de giro del generador sobrepasando la sincrónica.

Por acción del campo magnético de la corriente del estator, se originará corrientes en el dentado y en las cuñas del rotor, lo mismo que en su devanado, si este permanece conectado a la excitatriz o a una resistencia de autoexcitación.

El flujo magnético de estas corrientes, interactuando junto con el flujo magnético del estator, crea un momento asincrónico de freno, que hace posible que el generador entregue potencia activa al sistema, en un régimen asincrónico.

Este momento asincrónico de freno, crece al -

aumentar el deslizamiento del rotor, cuando este sea igual al momento de giro de la turbina dejará de aumentar el deslizamiento y sólo entonces tendrá lugar un régimen asincrónico estable. (10)\*

La máquina en estas condiciones opera como un generador de inducción con una velocidad de deslizamiento de 2 a 5% mayor que la velocidad de deslizamiento normal de la máquina, consecuentemente la máquina estará entregando Potencia Activa al sistema, pero la potencia entregada en tal circunstancia no será la Potencia nominal que la máquina puede entregar al tener su excitación intacta, pues el regulador de velocidad de la turbina reacciona al aumento de frecuencia de rotación, disminuyendo el ingreso de vapor (agua) con lo que disminuye también la potencia activa del generador. Por esto como regla general, como resultado de la pérdida de excitación se disminuye la Potencia activa del generador. (11)\*

Si la máquina sincrónica opera como generador de inducción el rotor está sujeto a una corriente inducida de calentamiento de baja frecuencia, y por el estator circulará una corriente que en todo caso es más alta que la corriente de placa de la máquina, - consecuentemente una máquina sincrónica operando sin

su campo se ve estimulada por grandes flujos de reactivos que vienen desde el sistema al cual está conectada la máquina y cualquiera que sea la causa de la pérdida de excitación, ocasionará una respuesta inmediata del sistema y, esta respuesta lógicamente dependerá de la capacidad de reactivos del sistema y la máquina puede generar el flujo reactivo inicial - máximo en pocos segundos.

Por el mismo hecho de que una máquina sincrónica pierde su excitación, se producirá un aumento de la velocidad de la máquina, o lo que hace posible que la máquina obtenga su excitación del sistema al cual está conectada, mediante grandes flujos de Potencia reactiva del sistema, flujos que pueden ocasionar - grandes daños en la máquina.

Es importante advertir que la velocidad inicial de la máquina con su campo desconectado por la pérdida de excitación, dependerá de la carga inicial de la máquina y de la habilidad del sistema para proveer la excitación requerida y es así como un sistema - fuerte puede en forma efectiva forzar a la máquina - sin campo de excitación a operar en una sincronización relativa como GENERADOR DE INDUCCION.

Para el caso de máquinas conectadas a sistemas débiles el aporte de esos sistemas para proveer la excitación o estímulo al generador que está operando con su campo desconectado es bajo, lo que puede provocar severas depresiones en el voltaje generado por la máquina así como también puede producir la salida de cualquier otro equipo conectado al sistema (12)\*

A pesar de los fenómenos que ocurren después de que un generador sincrónico ha perdido su excitación se cree que el generador sincrónico puede operar como asincrónico, sin causar, daños indebidos y es así como los turbogeneradores son capaces de entregar 40 - 50% del valor de su potencia nominal operando de modo asincrónico y con bajos valores de deslizamiento, y es interesante destacar que la operación asincrónica debido a la pérdida de excitación puede permitirse por un período limitado de tiempo, el mismo que puede ser tan alto como media hora.

Es posible arreglar un cortocircuito a través de una resistencia de descarga de valor considerable, de modo que pueda establecerse una relación entre la potencia total entregada, corriente del estator y demanda de Potencia reactiva.

Dicho cortocircuito permite que el generador - pueda ser resincronizado al sistema, después de un corto período de pérdida de excitación, con lo que se logra eliminar la demora que representa el cancelar la unidad y luego reconectarla al sistema. - Además, se prevendrá la pérdida total de potencia - de la unidad generadora.

Se ha dicho que se produce calentamiento del rotor cuando una máquina sincrónica ha perdido su excitación, sin embargo, este calentamiento es menos problemático que el calentamiento del estator cuando la máquina esta funcionando asincrónicamente, esto es como generador de inducción, consecuentemente cabe anotar que si un generador conectado a un sistema, pierde su excitación se podría producir en él un daño térmico, debido al calentamiento del rotor y estator.

Si el generador conectado a un sistema, está ligeramente cargado, la variación en carga y en el voltaje terminal serán considerables cuando dicho generador pierde su excitación. (12)\*

Es importante acotar que cuando una máquina que está cargada inicialmente pierde su excitación, la

carga final en MVA probablemente no estará dañando a la máquina, pero en cambio el drenaje de VAR puede perjudicar a la máquina y al sistema.

Experimentos realizados en el Estado de Michigan en los E.E.U.U. han arrojado como resultado que cuando una máquina está cargada completamente y en ella se produce la pérdida de excitación se dice - que los efectos producidos por tal circunstancia, pueden estar dañando a la máquina y al sistema y - mientras la carga final, en términos de MVA no sea excesiva, la máquina tendrá estabilizadas las corrientes.

Cuando en la máquina sincrónica se produce la pérdida de excitación se puede observar que el voltaje terminal de la máquina puede bajar ostensiblemente y consecuentemente la corriente que circulará por el estator subirá notablemente con el fin de entregar la potencia (P) que estaba suministrando antes de que se produzca la pérdida de excitación. El hecho de producirse el drenaje de los VAR del sistema hacia el generador puede afectar el funcionamiento del generador, ya que tal drenaje produce la depresión del voltaje del generador. (11)\*

En el régimen asincrónico se induce voltaje en el devanado del rotor. Si el devanado está desconectado a la excitatriz eléctrica sino a un sistema rectificador de excitación que no permite el paso de corrientes de polaridad contraria, entonces al producirse deslizamientos, grandes, el voltaje inducido puede alcanzar valores peligrosos para el devanado y los reguladores. Esto es especialmente peligroso en los generadores hidroeléctricos en donde la relación del número de espiras del devanado de excitación y del estator es considerablemente mayor que los generadores termoeléctricos y por tanto la acción del apantallamiento del acero del estator es más débil.

Al pasar el generador a un régimen asincrónico es necesario conectar automáticamente o manualmente una resistencia al devanado del rotor.

En la actualidad se usa este régimen asincrónico, así sea durante el tiempo de traspaso a la excitatriz de reserva, lo que permite evitar en la mayoría de los casos que se detengan los generadores por fallas en la excitatriz.

Para esto se han de observar las siguientes con

diciones:

- 1.- La carga activa debe disminuirse a un 50 - 70% de la nominal del generador.
- 2.- El tiempo que dura el régimen asincrónico considerando el tiempo de descarga no debe ser mayor que 30 minutos para los generadores con refrigeración indirecta y 15 minutos para las máquinas de otros tipos.

Los generadores hidroelectricos debido a su gran deslizamiento en el régimen asincrónico permiten un calentamiento más rápido en el devanado de amortiguamiento. Por lo tanto no se permite que los generadores hidroeléctricos trabajen en el régimen asincrónico, por mucho tiempo y al perder éstos la excitación se desconectan automáticamente mediante una protección especial o la protección de sobrecorriente del estator. (10)\*

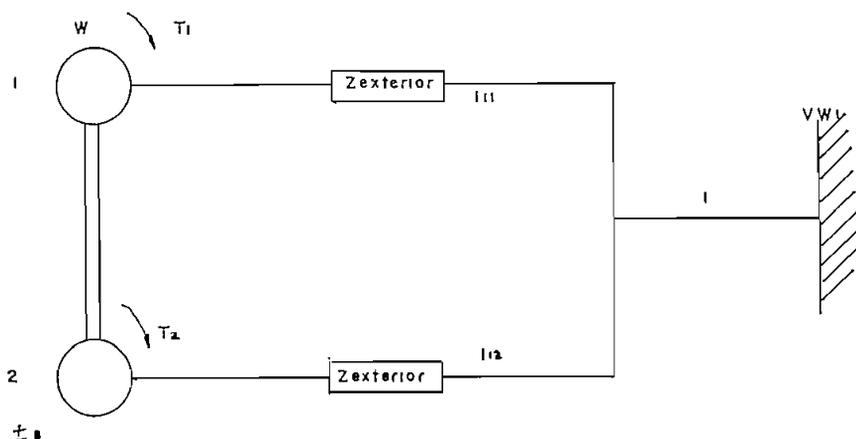


Figura 2.06.- Esquema equivalente para el estudio asincrónico de pérdida de excitación.

Las corrientes que se inducen en el rotor, debido al asincronismo de la máquina sincrónica, al perder la excitación como se ha dicho anteriormente, origina el calentamiento del rotor, y dicho calentamiento es mayor cuando el deslizamiento es mayor, esto se explica ya que debido al desplazamiento de las corrientes en la superficie del rotor aumenta la resistencia equivalente del mismo. Y es posible que ocurran calentamientos mayores que los permitidos para determinados puntos del rotor, -sobre todo en sus extremos, por cuanto la distribución de las pérdidas en el rotor no es homogénea.

A medida que el deslizamiento aumenta, las corrientes que circulan por el estator fácilmente superan su valor nominal, produciéndose de esta manera el sobrecalentamiento de los enrollados del estator. (17)\*

Para comenzar el estudio matemático del asincronismo de la máquina sincrónica, partiremos de que tenemos un generador conectado a un sistema (barra infinita) así:

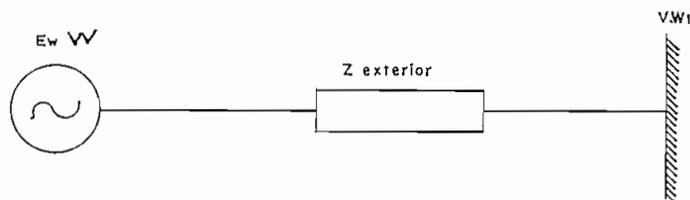


Fig. 2.04. Generador sincrónico conectado a una barra de Potencia infinita

En donde, el generador sincrónico gira a una velocidad  $W$  diferente de la sincrónica  $W_1$ , y que la barra de Potencia infinita mantiene constante el voltaje y la frecuencia.

El diagrama fasorial de la figura 2.04 se lo puede ver en la siguiente figura:

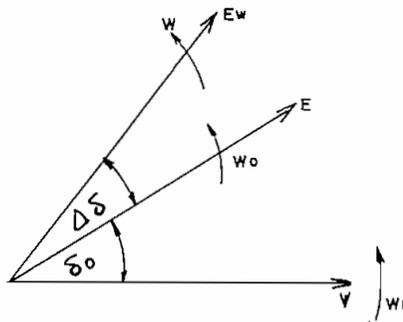


Figura 2.05 Diagrama Fasorial de la Figura 2.04

Si suponemos que  $\delta_0 = \delta$ , la velocidad de giro del fasor  $E$  cambia, igualándose a  $W$ , en lugar de  $W_1$ .

De la figura 2.05 se establece que:

$$\delta = \delta_0 + \Delta\delta$$

$$\Delta\delta = -stW_1$$

Donde:

$s$  = Deslizamiento y viene dado por

$$s = - \frac{d\delta}{Wdt} = \frac{W_1 - W}{W_1} = 1 - \frac{W}{W_1}$$

$$\underline{W} = \frac{W}{W_1}$$

$$W_* = (1 - S)$$

A medida que crece la velocidad sobre la sincrónica,  $\delta$  crece y el deslizamiento es negativo (generador)

Entre los procesos específicos que ocurren durante el asincronismo de la máquina sincrónica, podemos hablar de:

- Que tanto en la máquina (generador) como en la línea de transmisión circularan corrientes que van a tener componentes de dos frecuencias  $W$  y  $W_1$ . Los valores instantáneos de la corriente resultante, produce pulsaciones, a pesar de esto no vamos a considerar así y se trabajará sólo con los valores efectivos de corriente y voltaje.
- Que al mismo tiempo el generador sincrónico adquiere las características de las máquinas asincrónicas, ya que en los devanados cortocircuitados del rotor y en sus circuitos equivalentes circularan corrientes condicionadas por la existencia de un deslizamiento.
- Que se presentan variaciones de los parámetros de la máquina sincrónica y es así como vemos que la f.e.m.

*conclusion*

$E_w$  depende del deslizamiento y las corrientes creadas por ésta f.e.m. circularan por las reactancias de la máquina sincrónica, las mismas que variarían para dichas corrientes en la relación  $W/W_1$ , adquiriendo nuevos valores así:

$$X(W) = \frac{W}{W_1} X$$

Para encontrar las características estáticas de la Potencia del Generador en un régimen asincrónico - podemos proceder de la siguiente manera:

En primer lugar, se supone que la máquina en estudio puede dividirse en dos, una sincrónica y otra asincrónica. La máquina sincrónica relacionada con  $V$ , trabaja a una velocidad  $W$ , tiene una f.e.m.  $E_w$  y desarrolla un torque  $T_1$ .

La máquina asincrónica que se encuentra unida a  $V$ , trabaja con deslizamiento  $S$  y puede trabajar tanto como generador o como motor, dependiendo naturalmente del signo de  $S$ . (Fig. 2,06)

Los parámetros de la máquina asincrónica se determinan con los devanados del rotor en cortocircuito; - la impedancia del sistema será relacionada al circuito del estator de cada máquina. (18)\*

Ahora para determinar las ecuaciones del torque comenzaremos por el generador sincrónico 1 conectado a la barra de Voltaje V, del gráfico 2.06 y en base al teorema de superposición podemos escribir que:

$$\dot{I} = \dot{I}_{11} - \dot{I}_{12} = \frac{\dot{E}_w}{\dot{Z}_w} - \frac{\dot{V}}{\dot{Z}}$$

Aquí:  $\dot{Z} = r + jX$  y  $\dot{Z}_w = r + j W X = r + j (1-s)X$

La potencia al comienzo y al final de la línea tendrá los siguientes valores:

$$\dot{S}_1 = P_1 + jQ_1 = \dot{E}_w I^*$$

$$\dot{S}_2 = P_2 + jQ_2 = \dot{V} I^*$$

Para la determinación de  $\dot{E}_w$  supondremos que las corrientes adicionales (inducidas) debidas a excitaciones independientes y producidas por el deslizamiento se consideran ya en la máquina asincrónica 2, entonces  $\dot{E}_w = \dot{W}E$ . - Para el caso en el que la excitación se obtiene de la excitatriz o la subexcitatriz, montadas en el mismo eje del generador, entonces  $E_w = W^3 E$  y de acuerdo a esto, podemos escribir en forma general que  $E_w = W^n E$ , en donde n representa el número de transformaciones para llegar a relacionar  $\dot{E}_w$  con E.

Teniendo presente lo anterior podemos escribir que:

$$S1 = \frac{\dot{E} E^* W^{2n}}{Z W^*} - \frac{V \dot{E} W^n}{Z^*}$$

En donde:

$$\dot{V} = V \sqrt{Wt + 0} \quad Z W^* = r - j W X^*$$

$$\dot{E} = E \sqrt{Wt + st + \delta 0} \quad Z^* = r - j X$$

$$\therefore \dot{S}1 = P1 + jQ1$$

$$\Rightarrow P1 = \text{Real de } \dot{S}1$$

$$\Rightarrow P1 = \frac{E^2 W^2 r w}{Z^2} + \frac{V E W^n}{Z} \text{ Sen} (\delta 0 - st - \alpha) \quad (2.09)$$

En donde:

$$\alpha = \text{arctg} \frac{r}{X} \quad ; \quad r w = \frac{(r^2 + X^2) r}{r^2 + (W X)^2} W^{2n-2}$$

La parte imaginaria de S1 nos da la potencia reactiva, así:

$$Q1 = \frac{E^2 W^2}{Z^2} X w - \frac{V E W^n}{Z} \text{ Cos} (\delta 0 - st - \alpha) \quad (2.10)$$

$$\text{En donde: } X w = \frac{r^2 + X^2}{r^2 + (W r)^2} \times W^{2n-2}$$

El torque del generador (1) será:

$$T1 = \frac{P1}{W} = \frac{E^2 W^2}{Z^2 W} r w + \frac{V E W^n}{Z \cdot W} \text{ Sen} (\delta 0 - st - \alpha)$$

$$T1 = \frac{E^2 (1-s) r w}{Z^2} + \frac{V E (1-s)^{n-1}}{Z} \text{ Sen} (\delta 0 - st - \alpha) \quad (2.11)$$

La expresión (2.11) puede escribirse como sigue:

$$T1 = T11 + T12 \text{ Sen } (\delta_0 - \alpha) \quad (2.12)$$

De esta expresión se puede decir:

T11 = Es el torque propio y viene dado por la interacción del devanado del rotor, alimentado con E y el devanado del estator, conectado a la resistencia  $r_w$ . Como puede verse en la fórmula, el T11 depende del deslizamiento y para  $n = 1$  T11 se transforma en:

$$T11 = \frac{E^2 r_w}{r^2 + (Wx)^2} \quad (2.13)$$

La fórmula (2.13) es análoga a la fórmula de torque de los motores asincrónicos y si hacemos  $s = 0$ , el torque T11 se convierte en la Potencia propia P11.

El segundo término de la expresión (2.12) se llama torque mutuo y para  $s=0$ , el torque mutuo se transforma en Potencia mutua. (P12)

En conclusión se puede decir que tanto el torque propio como el torque mutuo son función del deslizamiento.

La Potencia al final de línea de transmisión, es decir en la barra infinita estará dada por:

$$S2 = \dot{V}I^* = P2 + jQ2$$

$$\dot{S}_2 = \dot{V} \left( \frac{\dot{E}_w}{Z} - \frac{\dot{V}}{Z} \right)^*$$

$$\Rightarrow P_2 = \text{Real de } \dot{S}_2 = \frac{EV}{Z} \sqrt{\frac{1 + \rho^2}{(1-s)^2 + \rho^2}} W^n \text{Sen} (\delta_{0-st} + \alpha_w) - \frac{V^2}{Z} \cos \alpha \quad (2.14)$$

$$\text{y } Q_2 = \text{Imag } \dot{S}_2 = \frac{EV}{Z} \sqrt{\frac{1 + \rho^2}{(1-s)^2 + \rho^2}} W^n \text{Cos} (\delta_{0-st} + \alpha_w) - \frac{V^2}{Z} \cos \alpha \quad (2.15)$$

Donde:  $\rho = \frac{r}{X}$        $\alpha_w = \arctg \frac{r}{WX}$

Las pérdidas de potencia en la resistencia para una variación continua de la magnitud y la posición del vector  $E_w$ , resulta no ser igual a la diferencia de Potencia Activa entre el comienzo y final de la transmisión.

En definitiva tenemos que:

$$P_1 - P_2 = I^2 r + \Delta \mathcal{Q}(s)$$

en donde:  $\Delta \mathcal{Q}(s)$  representan las pérdidas adicionales - debidas al deslizamiento.

La naturaleza de estas pérdidas adicionales se aprecian mejor haciendo la resistencia del estator despreciable ( $r=0$ ). Si consideramos  $\delta_0 = 0$ ,  $r = 0$ ,  $\alpha = 0$ , de (2.09) u (2.14) tenemos:

$$P1 = \frac{-EV}{X} W_*^n \text{ Sen st}$$

$$P2 = \frac{-EV}{X} W_*^{n-1} \text{ Sen st}$$

Realizando la diferencia de estas dos potencias, podemos ver que:

$$\Delta \mathcal{P}(s) = P1 - P2 = \Delta P = \frac{S}{1-S} \frac{E W_*^n V}{X} \text{ Sen st} \quad (2.16)$$

Al no existir  $r$ , la diferencia de potencia activa se consume solamente en la variación de la energía  $W_L$ , acumulada en la inductancia, que une los puntos de aplicación  $E$  y  $V$ .

La diferencia de potencia activa podemos también expresarle mediante las pérdidas de potencia reactiva y la velocidad media angular.

Por definición:  $W_L = \frac{LI^2}{2}$  y  $\frac{d W_L}{dt} = \Delta P$ .

$$W_* \text{ medio} = \frac{1 + W_*}{2} = \frac{2-S}{2}$$

$$W_L = \frac{L W_* \text{ medio}}{2 W_* \text{ medio}} \frac{I^2}{2} = \frac{\Delta Q}{2-S}$$

$\Delta Q$  encontramos haciendo la diferencia entre (2.10) y (2.15) y teniendo presente que  $r = 0$

$$WL = Q1 - Q2 = \frac{1}{1-s} \frac{EW^m V}{X} \cos st + \frac{V^2}{(2-s)X} + \frac{E^2 W^{2n}}{(1-s)X(2-s)} \quad (2.17)$$

derivando (2.17) respecto a t , tenemos:

$$\frac{dWL}{dt} = \frac{s}{1-s} \frac{EW^m}{X} \times V \sin st = \Delta P \quad (2.18)$$

De (2.18) tenemos:  $P2 = P1 - \frac{dWL}{dt}$

Si tomamos en cuenta r , tendremos:

$$P2 = P1 - I^2 r - \frac{dWL}{dt} \quad (2.19)$$

TORQUE ASINCRONICO.- Para encontrar la magnitud del torque producido por la máquina 2, a la misma que consideraremos generador cuando el deslizamiento es negativo y como motor cuando éste es positivo. Supondremos que el rotor de la máquina 2 tiene un solo devanado de excitación distribuido homogéneamente, y de acuerdo a esta consideración podemos decir que el torque viene expresado por:

$$T2 = - \frac{V^2 r s}{r^2 + (X1 s)^2} = - \frac{V^2 s X1/r}{X1 \left[ 1 + \left( \frac{X1}{r} s \right)^2 \right]} \quad (2.20)$$

Donde:

X1 y r son los parámetros del esquema equivalente del generador asincrónico y si reemplazamos en la expresión -

(2.20) X1 por

$$X1 = \frac{X_d x_d'}{x_d + x_d'} \quad \text{y} \quad \frac{X1}{r} \quad \text{por} \quad \frac{x1}{r} = T_d'$$
$$\Rightarrow T2 = -V^2 \frac{(x_d + x_d')}{x_d x_d'} \cdot \frac{T_d S}{1 + (T_d S')^2} \quad (2.21)$$

Para deslizamientos muy pequeños a veces se desprecia  $(T_d S')^2$  y se representa el T2 de la siguiente manera:

$$T2 = -P_d S$$

donde  $P_d = \frac{V^2 (x_d + x_d')}{x_d x_d'} T_d'$

El momento total, que actúa sobre el rotor de la máquina sincrónica, que trabaja con una velocidad diferente a la sincrónica será:

$$T = T1 + T2$$

En donde T1 se determina mediante (2.11) o (2.13) y T2 mediante (2.21)

### TERCER CAPITULO

Para el estudio de la pérdida de excitación de la máquina sincrónica en el laboratorio se ha creído conveniente realizar los siguientes experimentos:

- GENERADOR SINCRONICO CON EL CAMPO CORTOCIRCUITADO Y CONECTADO A UNA BARRA DE POTENCIA INFINITA.
- GENERADOR SINCRONICO CON EL CAMPO ABIERTO Y CONECTADO A UNA BARRA EN POTENCIA INFINITA.
- GENERADOR SINCRONICO CONECTADO A UN BANCO DE CAPACITORES.

Para la realización de los experimentos se ha utilizado los siguientes instrumentos:

- 1 Grupo motor-generador
- 1 Osciloscopio con dos canales y cámara fotográfica
- 1 Contactor
- 1 Pulsante
- 1 Resistencia de  $1\Omega$
- 1 Resistencia de  $2400\Omega$  , 1 resistencia de  $8000\Omega$
- 1 Resistencia de  $296\Omega$  para el campo
- 1 Voltímetro de c.c.
- 1 Estroboscopio

- 1 Analizador industrial
- 1 Resistencia de  $715\Omega$  para el circuito de control
- 1 Switch
- 1 Banco de Capacitores de 64,  $\mu F$

Elementos que han sido combinados en los siguientes circuitos:

- a) Circuito Principal
- b) Circuito de Control
- c) Circuito de Disparo

El Circuito Principal varía para los tres experimentos, en tanto que los circuitos de control y de disparo permanecen invariables y estos se dibujaran uno sola vez; en tanto que los circuitos principales se presentaran con cada experimento.

### PRIMER EXPERIMENTO

#### a) Circuito Principal

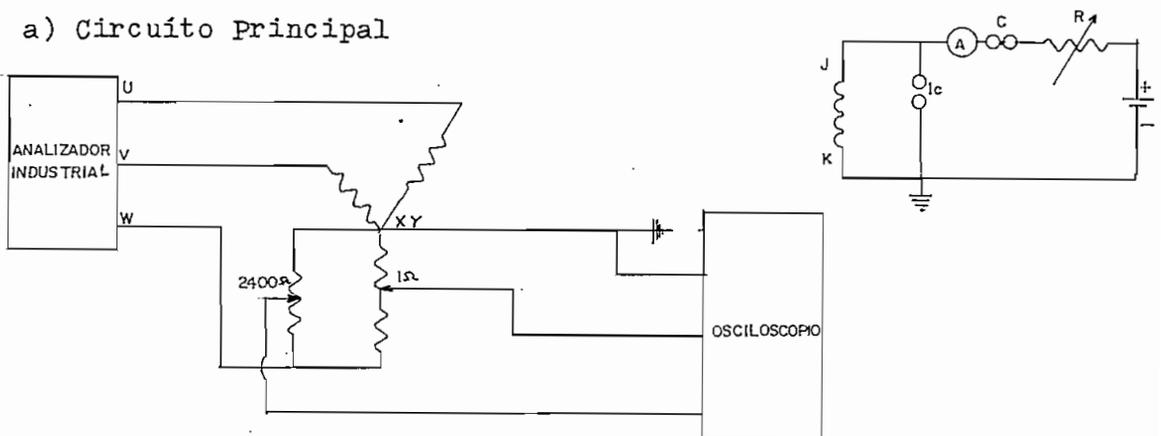


Fig. 3.01.-Circuito Principal

b) Circuito de Control.- Este circuito se diseña con el propósito de efectuar la pérdida de excitación con precisión, mediante el empleo de un contador energizado por el pulsante P1.

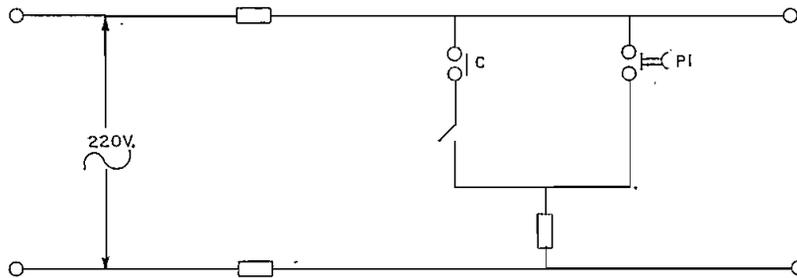


Fig. 3.02-Circuito de Control

c) Circuito de Disparo.- Este circuito ha sido diseñado con el propósito de dar confiabilidad para obtener la señal en el osciloscopio, cuando se produce la pérdida de excitación, y de esta manera, poder observar el fenómeno sin riesgo de perderlo.

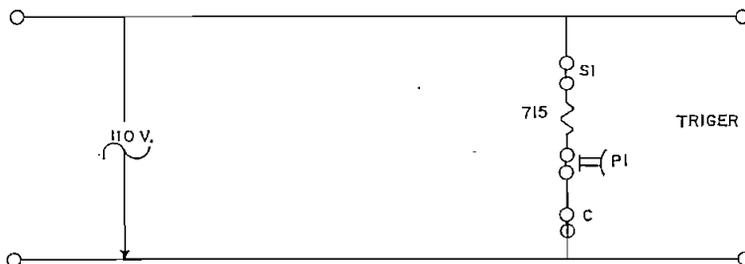


Fig. 3.03.-Circuito de Disparo

FUNCIONAMIENTO.- Para el estudio de la pérdida de excitación de la máquina sincrónica conectada a una red de potencia infinita, se debe proceder de la siguiente manera:

Tenemos que poner en paralelo la máquina y la red y para ello se debe realizar lo siguiente:

- 1.- Se hace arrancar la máquina motriz en el sentido que se indica en la misma, luego se lleva a la máquina a la velocidad del sincronismo, manipulando el regulador de velocidad de la misma y una vez alcanzada la velocidad sincrónica se desconecta la máquina motriz.
- 2.- Se hace arrancar a la máquina sincrónica como motor de inducción y se comprueba que el sentido de giro sea el mismo que el de la máquina motriz.
- 3.- Luego se conecta la excitación a la máquina sincrónica y valiéndonos del reóstato de campo, hacemos circular 0.6A, con lo que el motor de inducción se convierte en motor sincrónico.
- 4.- por último, se conecta el interruptor que alimenta a la máquina motriz, quedando de esta manera en paralelo la máquina y la red; variando el reóstato de campo

y el regulador de velocidad de la máquina motriz, podremos hacer que la máquina trabaje como generador o como motor.

Como interesa que la máquina trabaje como generador, se ha calibrado en el analizador industrial tres cargas, a saber 1.800 (w), 1.000 (w) y 800 (w), con factores de potencia 0.9, 0.8, 0.7 inductivos.

Estando el generador sincrónico entregando potencia activa y reactiva al sistema, se quita la excitación y se obtiene el transitorio mediante la pulsación de P1 del circuito de control (fig. 3.02), ya que al pulsar P1 queda energizada la bobina del contactor C y, consecuentemente todos los contactos abiertos del mismo se cierran y los cerrados se abren, con lo que el campo del generador queda cortocircuitado y sin excitación como puede verse en el circuito de la (fig. 3.01)

Con el analizador Industrial podemos medir los valores de Potencia Activa y Reactiva antes y después de haberse producido la pérdida de excitación. Dichos valores nos dan en forma aproximada la variación de Potencia Activa y Reactiva.

Con los circuitos anteriores podemos obtener las formas de onda de voltaje y corriente antes y después

de haber perdido la excitación la máquina, así como también las formas de onda durante el funcionamiento sin campo, es decir sin excitación.

El primer experimento se lo realizará para tres estados de carga y diferentes factores de Potencia, con el propósito de ver la diferencia existente al producirse la pérdida de excitación, del generador sincrónico. Los estados de carga diferentes serán: 1.800, 1.000, 800 (w) y los factores de potencia 0.9, 0.8, 0.7 (inductivos)

#### PRESENTACION DE RESULTADOS

##### ANTES DE PERDER LA EXCITACION

###### Primer Estado de Carga (1.800 w)

Factor de Potencia	VL(v)	IL	P(w)	Q(var)	If(A)	Velocidad r.p.m.
0.7	200	7.43	1800	1674	1.1	1780
0.8	200	6.5	1800	1335	1.0	1780
0.9	200	5.8	1800	775	0.8	1780

###### Segundo Estado de Carga (1.000 w)

Factor de potencia	VL(v)	IL(A)	P(w)	Q(var)	If(A)	Velocidad r.p.m.
0.9	200	3.2	1000	432	0.6	1780

Tercer Estado de Carga (800 w)

Factor de Potencia	VL(v)	IL(A)	P(w)	Q(var)	If(A)	Velocidad r.p.m.
0.7	200	3.3	800	746	0.7	1780

---

DESPUES DE PERDER LA EXCITACION

Primer Estado de Carga (1.800 w)

Factor de Potencia	VL(v)	IL(A)	P(w)	Q(var)	If(A)	Velocidad r.p.m.
0.7	200	7.6	1270	-1557	--	1810
0.8	200	7.5	1270	-1626	--	1805
0.9	200	7.6	1270	-1678	--	1795

---

Segundo Estado de Carga (1.000 w)

Factor de Potencia	VL(v)	IL(A)	P(w)	Q(var)	If(A)	Velocidad r.p.m.
0.9	200	6.1	850	-951.5	--	1795

---

Tercer Estado de Carga (800 w)

Factor de Potencia	VL(v)	IL(A)	P(w)	Q(var)	If(A)	Velocidad r.p.m.
0.7	200	5.6	700	-778.5	--	1790

---

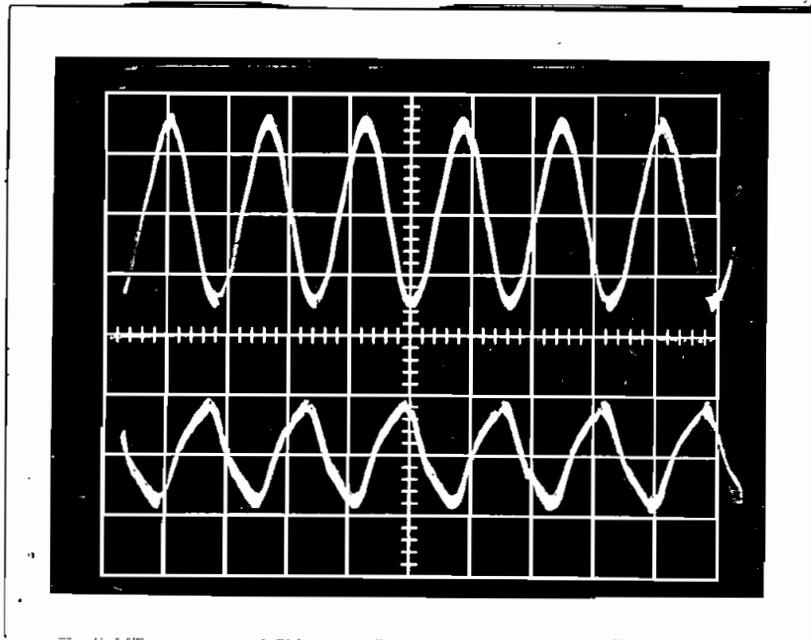
De los datos anteriores podemos decir que la -

máquina sincrónica, al perder su excitación, puede seguir entregando potencia activa y recibiendo reactiva del sistema.

En efecto la máquina sincrónica dependiendo del estado de carga, ésta puede entregar el 70, 85, 87% de la potencia activa calibrada.

- Mientras menor es la carga del generador, el fenómeno de pérdida de excitación es más acentuado, puesto que el estator se ve sometido a corrientes mayores, y por ende el rotor.
- La velocidad de la máquina aumenta al producirse la pérdida de excitación.
- El deslizamiento de la máquina, funcionando asincrónicamente, es del orden del 1.6%.

CORRIENTE  
Escala : 5 A/división



TIEMPO  
Escala : 10 mseg/división

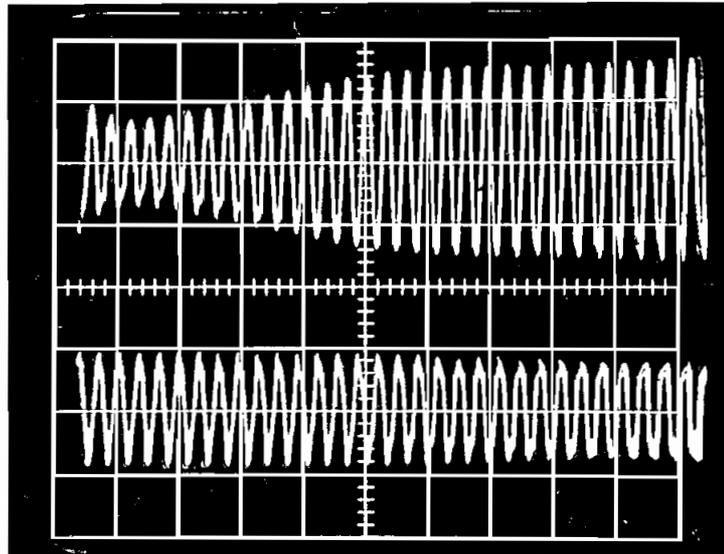
VOLTAJE  
Escala : 20 v/división

Foto 3.00 Máquina Sincrónica funcionando normalmente.

FOTOS TOMADAS EN EL OSCILOSCOPIO

EN EL TRANSITORIO

CORRIENTE  
Escala : 10 A/división

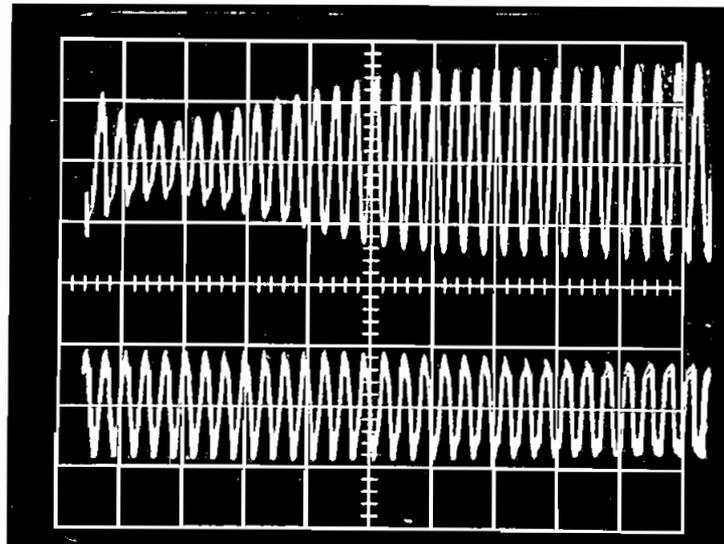


TIEMPO  
Escala : 50 m/división

VOLTAJE  
Escala : 20 vol./división

Foto 3.01. Máquina Sincrónica con 1.800 w de carga y  
 $f_p = 0.9$

CORRIENTE  
Escala : 10 A/división

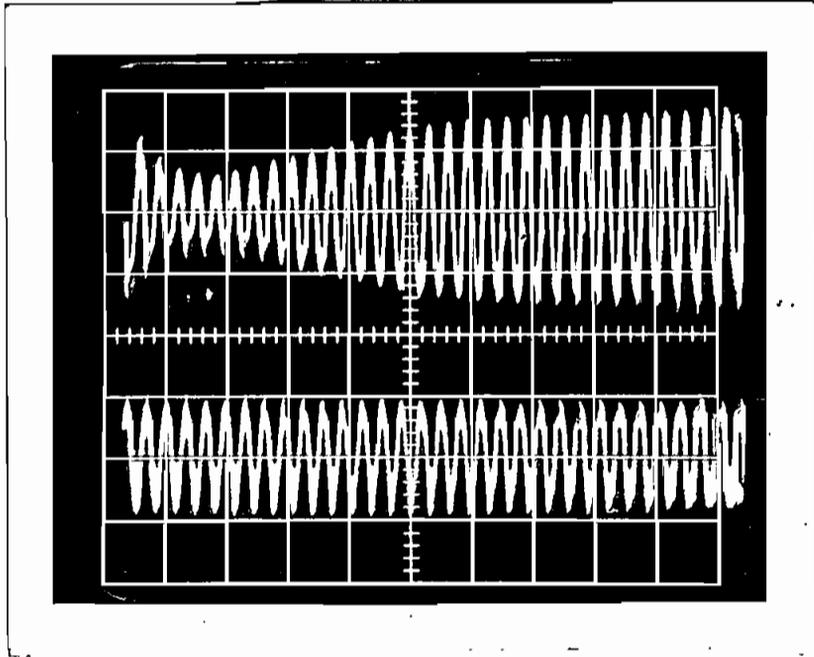


TIEMPO  
Escala : 20 vol./división

VOLTAJE  
Escala : 20 vol./división

Foto 3.011. Máquina Sincrónica con 1.800 w de carga y  
 $f_p = 0.8$

CORRIENTE  
Escala: 10A/división

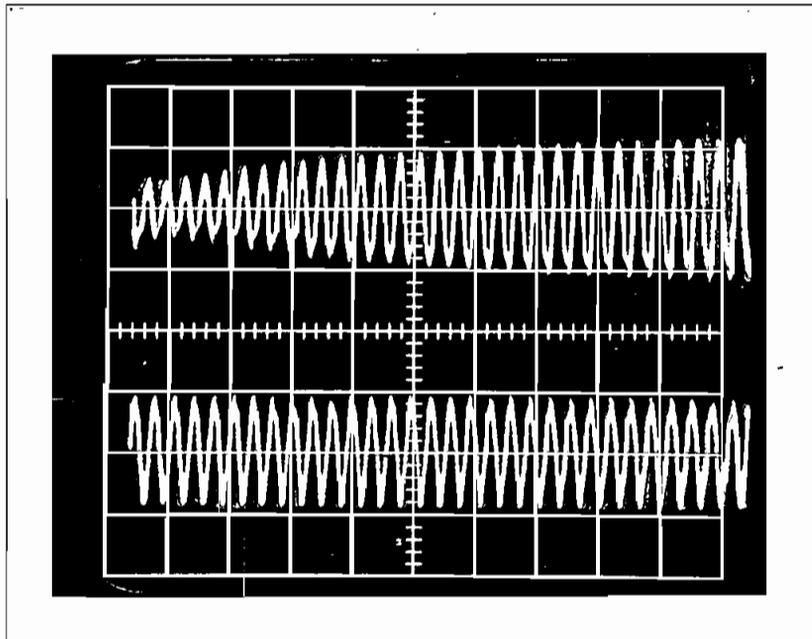


TIEMPO  
Escala: 50m./división

VOLTAJE  
Escala: 20vol./división

Foto 3.012. Máquina Sincrónica con 1.800 w de carga y  
 $f_p = 0.7$

CORRIENTE  
Escala: 10 A / división



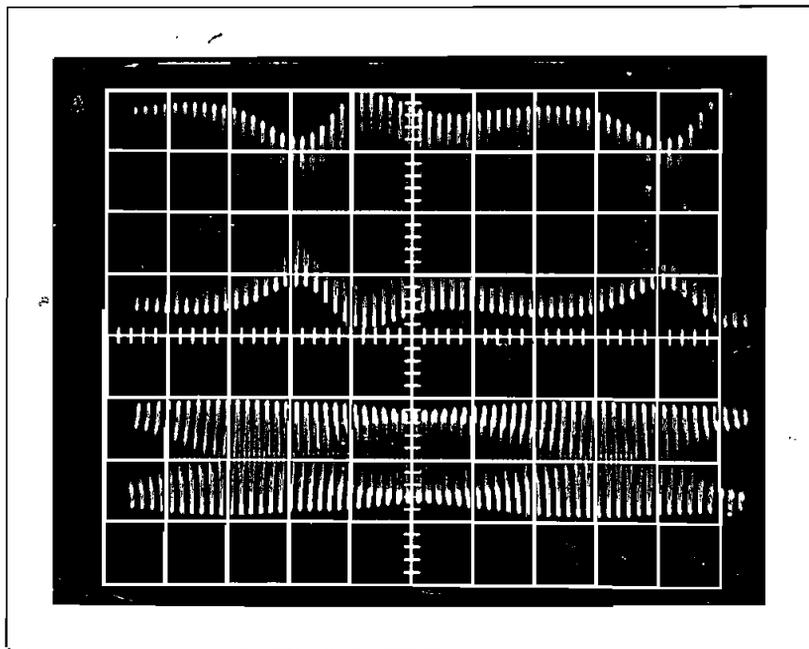
TIEMPO  
Escala: 50m./división

VOLTAJE  
Escala: 20vol./división

Foto 3.013. Máquina Sincrónica con 1.000 w de carga y  
 $f_p = 0.9$

FUNCIONANDO AS INCRONICAMENTE

CORRIENTE  
Escala : 10 A/división

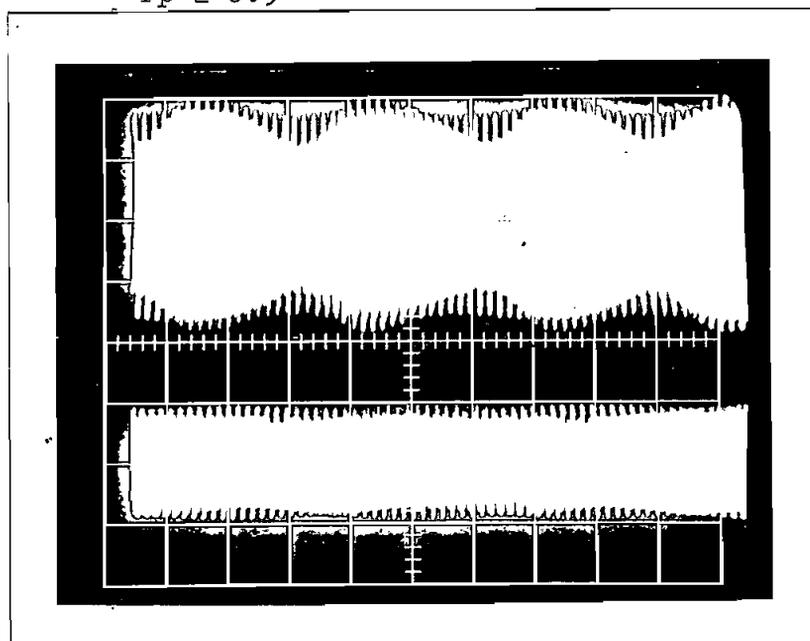


TIEMPO  
Escala : 0,1 Seg/división

VOLTAJE  
Escala : 20 vol/division

Foto 3.02. Máquina Sincrónica con 1.800 W de carga y  
 $fp = 0.9$

CORRIENTE  
Escala : 10 A/división

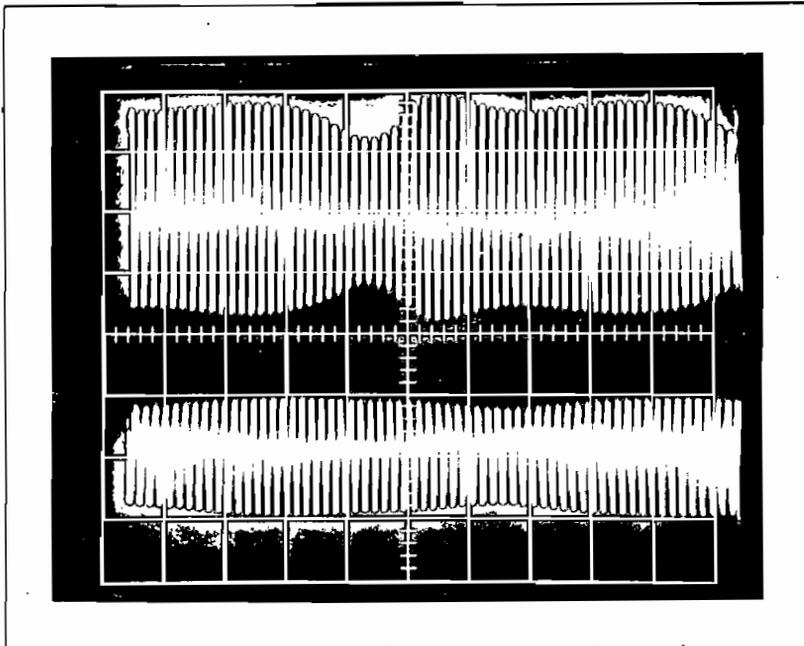


TIEMPO  
Escala : 0,1 Seg/división

VOLTAJE  
Escala : 20 vol/división

Foto 3.021. Máquina Sincrónica con 1.800 W de carga y  
 $fp = 0.8$

CORRIENTE  
Escala: 10A / división

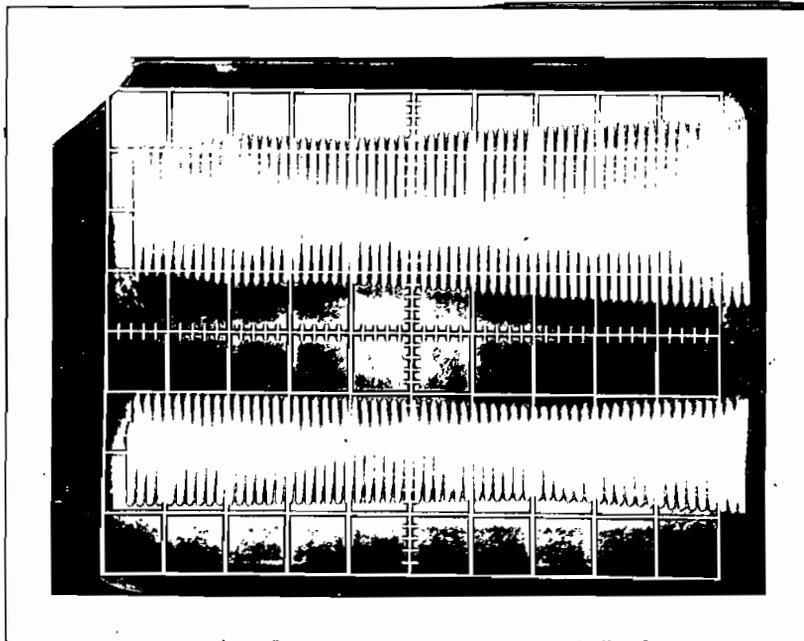


TIEMPO  
Escala: 0,1 Seg/división

VOLTAJE  
Escala: 20 vol/división

Foto 3.022. Máquina Sincrónica con 1.800 w de carga y  
 $f_p = 0.7$

CORRIENTE  
Escala: 10A / división



TIEMPO  
Escala: 0,1 Seg / división

VOLTAJE  
Escala: 20 vol/división

Foto 3.023. Máquina Sincrónica con 1.000 w de carga y  
 $f_p = 0.9$

En las fotografías del transitorio podemos observar que la teoría concuerda con la práctica; pues como puede verse en la forma de onda de voltaje no existe variación de su valor, pues el sistema al cual está conectada la máquina sincrónica es capaz de proporcionarle - los requerimientos de excitación de la misma.

Por otra parte en la forma de onda de corriente puede observarse que en principio la corriente pierde su valor original, pero esto es por un instante, para luego superar el valor original por el flujo de reactivos desde el sistema, con lo que se puede comprobar que el devanado del estator está sujeto a flujos de corrientes provenientes del sistema al cual la máquina está conectada.

De las fotografías de funcionamiento Asincrónico, podemos sacar las siguientes conclusiones:

- La inestabilidad de la máquina es evidente.
- De la forma de onda de voltaje podemos decir, que si - bien el sistema es capaz de proporcionar la excitación requerida por la máquina, no es menos cierto que el voltaje adquiere valores mayores que el valor que tenía - cuando la máquina estaba funcionando con su excitación.
- En la onda de corriente podemos observar un cambio de

frecuencia de oscilación y esto se puede explicar brevemente a continuación:

Cuando la máquina sincrónica pierde su excitación el campo pulsatorio monofásico creado por el devanado de excitación que ahora en c.c. opera como monofásico, podemos de acuerdo con la regla general, descomponerlo en campos directo y transversal que se desplazan con respecto al sistema del rotor.

El campo pulsatorio del rotor gira con una frecuencia ( $f_2$ ) igual a  $Sf_1$  y crea un campo que gira en sentido de rotación del rotor y otro campo que gira en sentido contrario al de rotación del rotor. La velocidad de rotación de cada campo con respecto al rotor es  $n_1 - n$ , donde  $n_1$  es la velocidad del estator y  $n$  es la velocidad de rotación del rotor.

Con respecto al devanado fijo del estator el primer campo tiene la velocidad

$$n_a = n + (n_1 - n) = n_1$$

es decir que este campo gira sincrónicamente con el producido por el devanado del estator, con todas las velocidades del rotor.

Con respecto al devanado fijo del estator, el segundo campo tiene la velocidad:

$$n_b = n - (n_1 - n) = 2n - n_1$$

$$\text{donde } n = (1 - S) n_1$$

$$\Rightarrow n_b = 2n_1 (1 - S) - n_1 = n_1 (1 - 2S)$$

Este campo produce en el devanado del estator una corriente cuya frecuencia es:

$$f' = p n_b = p n_1 (1 - 2S) = f_1 (1 - 2S)$$

Con lo que queda demostrado el cambio de frecuencia de oscilación.

Además, podemos decir que durante el régimen asincrónico existen grandes corrientes en el estator.

De lo observado en el desarrollo de la práctica se establece que la máquina empieza a oscilar a los 1.6 seg.

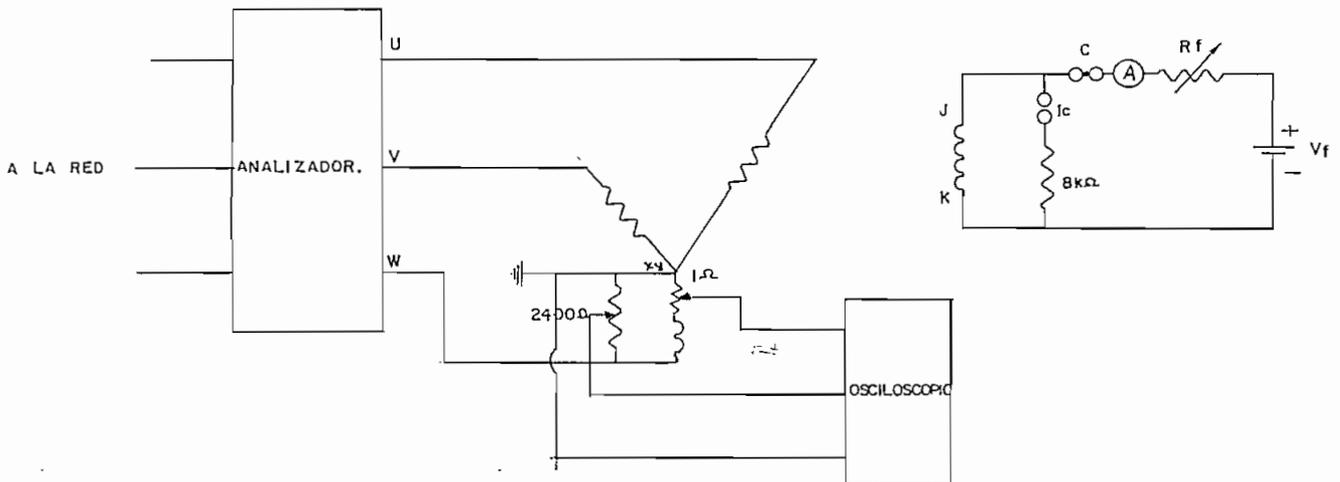
- Para un mismo estado de carga, pero distinto factor de Potencia, la máquina sincrónica, adquiere valores de corriente altos, más rápidamente que para el caso en el que la máquina este trabajando a un fp más bajo.

EXPERIMENTO N. 2

MAQUINA CON CAMPO ABIERTO

OBJETO.- Determinar la diferencia, respecto a la máquina conectada a la barra infinita pero con campo cortocircuitado.

DESCRIPCION.- En el experimento de la pérdida de excitación de la máquina conectada a una barra de potencia infinita, pero con el campo abierto, se presenta el peligro de que el devanado del rotor se dañe, por el transitorio producido por la apertura del campo. Para evitar el daño y con el fin de observar el fenómeno en el laboratorio, se ha modificado el circuito principal del experimento (1), para el efecto se ha introducido una resistencia de un valor alto ( $8K\Omega$ ) en serie con el contacto abierto del contactor, como puede verse en la siguiente figura:



Limitaciones del experimento:

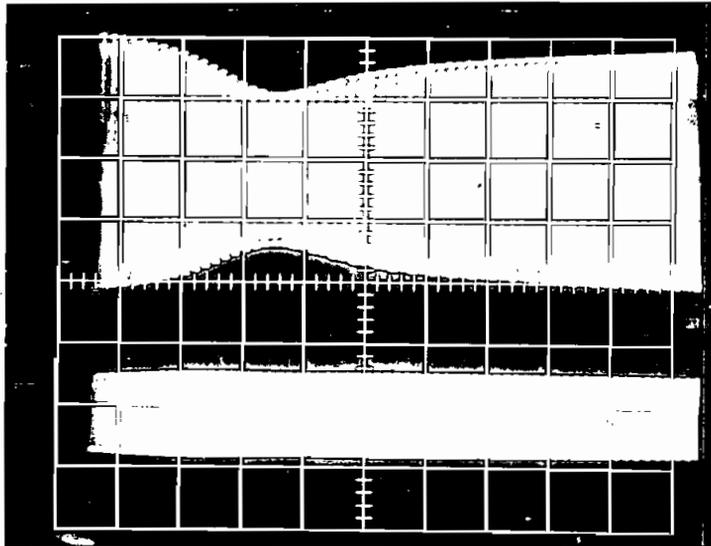
- La corriente de excitación es pequeña.
- No se pueden obtener señales de  $V_f$  e  $I_f$  en el osciloscopio por ser muy pequeñas.
- No se tomaron valores de Potencia.
- No se pudo llegar al mismo fp. que para el caso en el que la máquina estaba con 800 w. y con campo cortocircuitado, por el peligro de hacer circular más corriente que la permitida por la resistencia de  $8K\Omega$ .

MEDICIONES

CONDICION	$V_f$	$I_f$	IL	VL
Antes de perder la excitación	110.0	0.3(A)	3(A)	204(V)
	Voltios			
Después de perder la excitac.	30(V)	-	5.5(A)	204(V)
-----				

FUNCIIONANDO AS INCRONICAMENTE

CORRIENTE  
Escala: 10 A/división

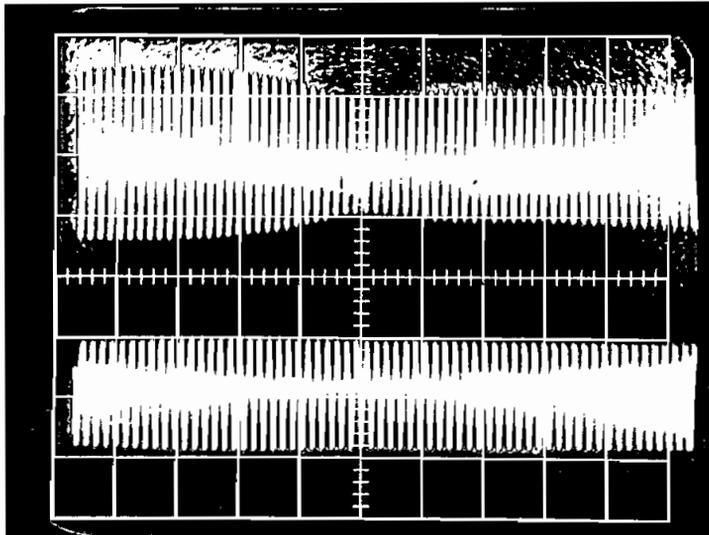


TIEMPO  
Escala: 0,1 Seg/división

VOLTAJE  
Escala: 20 vol/división

Foto 3.04  
Con campo abierto

CORRIENTE  
Escala: 10A/división



TIEMPO  
Escala: 0,1 Seg/división

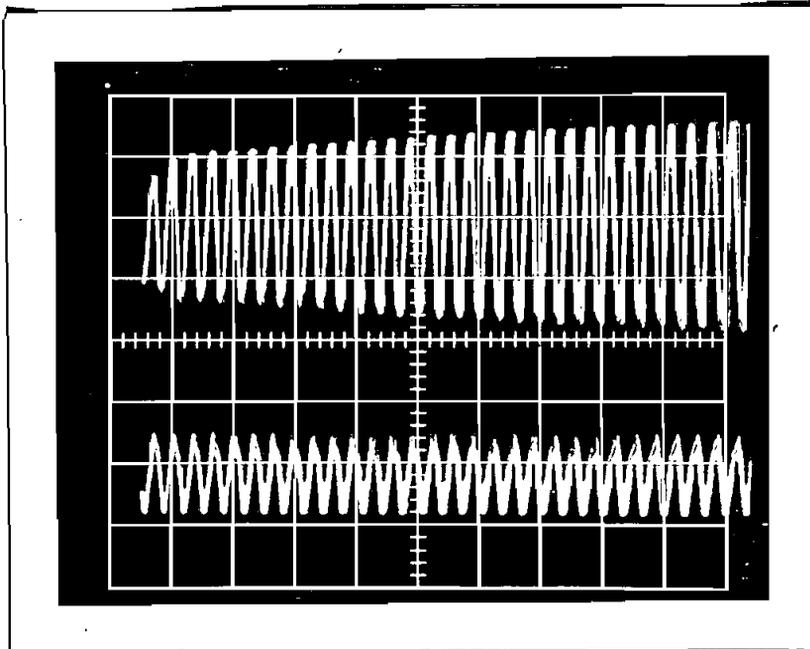
VOLTAJE  
Escala: 20 vol/división

Foto 3.041  
Con campo cortocircuitado

TRANSITORIO

CORRIENTE

Escala : 10 A / división



TIEMPO

Escala : 50 m. / división

VOLTAJE

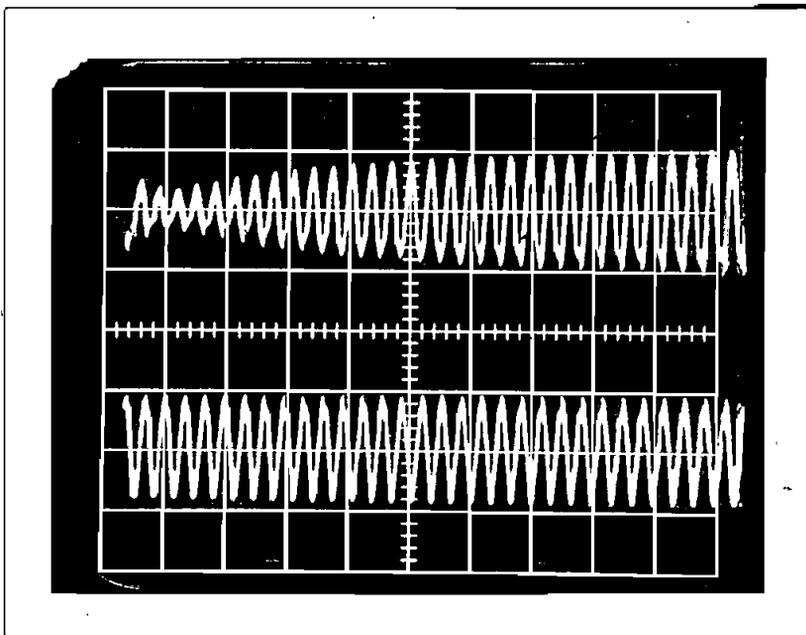
Escala : 20 vol / división

Foto 3.03

Con campo abierto

CORRIENTE

Escala : 10 A / división



TIEMPO

Escala : 50 m. / división

VOLTAJE

Escala : 20 vol / división

Foto 3.031

Con campo cortocircuitado



EXPERIMENTO N. 3

MAQUINA SINCRONICA CONECTADA A UNA CARGA CAPACITIVA

OBJETO.- Comprobar lo dicho en la primera parte del capítulo segundo.

DESCRIPCION.- Para desarrollar el experimento, primeramente he procedido a calcular el valor de la capacitancia que debe ser conectada a la máquina, mediante las fórmulas presentadas en el capítulo segundo, primera parte, así:

$$\frac{1}{X_d} < CW < \frac{1}{X_q}$$

Para la máquina utilizada en el laboratorio  $X_d = 27.5 \Omega$  y  $X_q = 15.8$

$$\frac{1}{27} < CW < \frac{1}{15.8} \quad Y \quad W = 2\pi f = 2\pi \times 60$$

$$98.2 \text{ MF} < C < 167.8 \text{ MF}$$

En este instante, a pesar de tener el rango de valores de C, necesarios para que se produzca la autoexcitación de la máquina, el experimento se ve sujeto a la limitación de obtener el valor de capacitancia en el laboratorio.

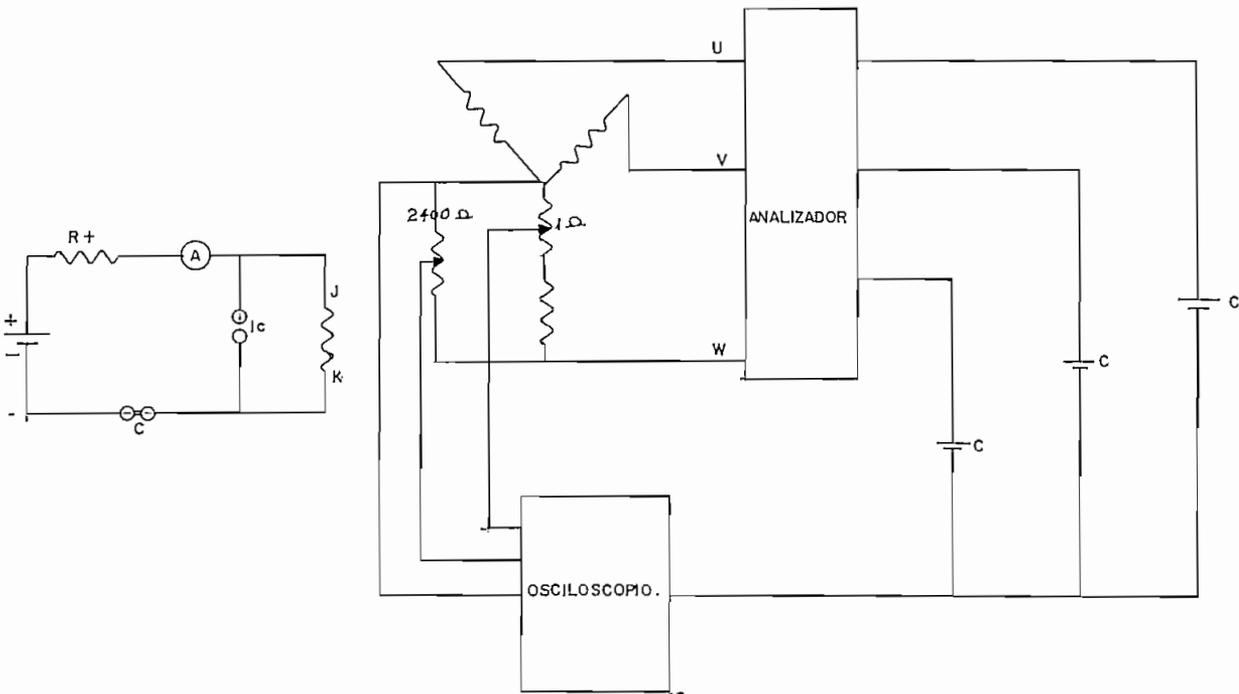
Para tener el valor de  $C$  se recurrió a:

- Conectar al generador sincrónico un motor sincrónico sobre-excitado.
- Tener un banco de capacitores, a partir del modelo de línea de transmisión que se tiene en el laboratorio.

La primera sugerencia falló, por cuanto el motor sincrónico sobre-excitado conectado a la máquina era muy pequeño y consecuentemente no podía suministrar la excitación requerida por el generador sincrónico, y al perder éste la excitación se observó que el generador dejaba de generar.

En vista del fracaso obtenido se procedió a obtener el valor de Capacitancia a partir del modelo de la línea de transmisión, en vista de que línea esta compuesta - de dos tramos de 100 Km., que tiene capacitancias (2) de 16  $\mu$ F cada uno, y un tramo de 200 Km. con capacitancias(2) de 32  $\mu$ F. Haciendo las conexiones respectivas se logró obtener el valor de 128  $\mu$ F, valor que esta dentro del rango de  $C$  establecido anteriormente.

Teniendo el valor de  $C$  requerido, se procedió a montar el siguiente circuito principal:



TERCER CIRCUITO PRINCIPAL.

Los circuitos de control y de disparo son los mismos que para el Experimento N. 1

Hasta aquí parecía que el experimento podría ser hecho sin ninguna complicación, pero tan pronto como se conectó la carga capacitiva al generador se observó que el banco de capacitores elevaba el voltaje a más de unos 800 V., poniendo en peligro tanto el aislamiento de la máquina como de los instrumentos y de los mismos capacitores.

Para solucionar el problema se plantea como posible solución lo siguiente:

- Bajar la excitación del generador al mínimo, con el fin de poder generar un voltaje bajo; y
- Disminuir tanto el valor de capacitancia, como el valor de la fuente de excitación de corriente continua.

La primera solución no dió resultado, puesto que la máquina a pesar de tener su excitación al mínimo valor, generaba 120 Voltios, los mismos que al aplicarse la carga capacitiva se elevaban a más de 400 Voltios, manteniéndose el problema de sobrevoltaje.

Para poder realizar el experimento se recurrió a la otra alternativa, es decir disminuir el valor de capacitancia de 123 a 64  $\mu\text{F}$  y generar con una tensión de alimentación de continua de 30 Voltios.

Hecho los arreglos anteriores, podemos obtener un valor de voltaje que no ofrecía peligro para el aislamiento, y consecuentemente se podía proceder con el experimento.

Resultados Obtenidos

Lecturas

CONDICION	VL	IL	Vf	If
Antes de perder la excitación	110 voltios	1(A)	30(V)	0.1(A)
Después de perder la excitación	28(V)	0.2(A)	0	0

FOTOGRAFIAS:

TRANSITORIO

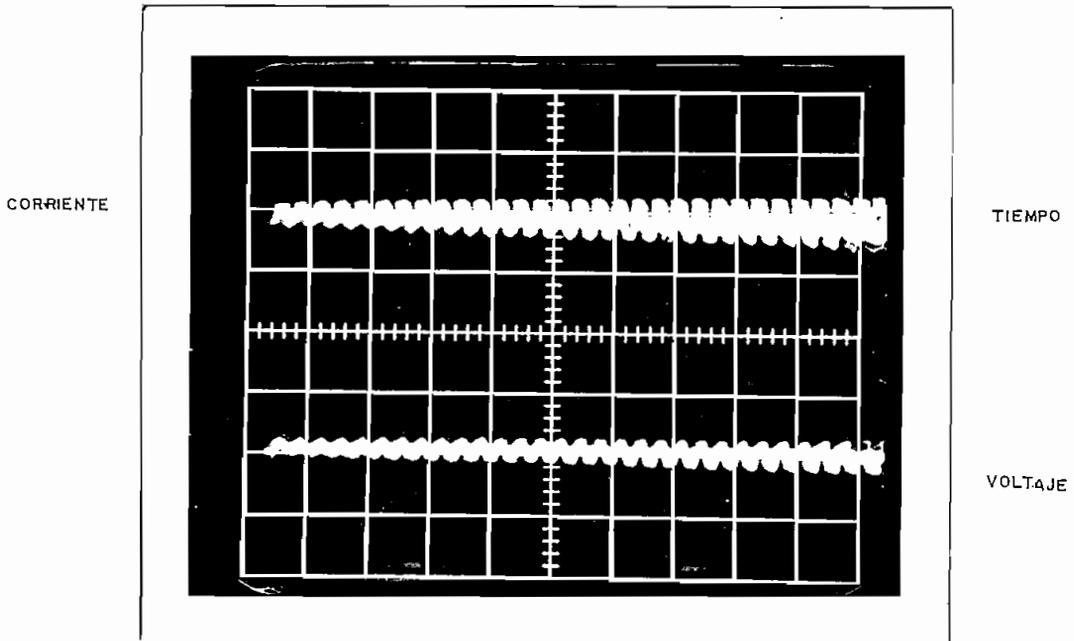


Foto 3.05

Escalas:

Voltaje: 20 voltios/div.

Tiempo: 50 mseg/div.

Corriente: 1 voltio/div.

FUNCIONANDO SINCRONICAMENTE

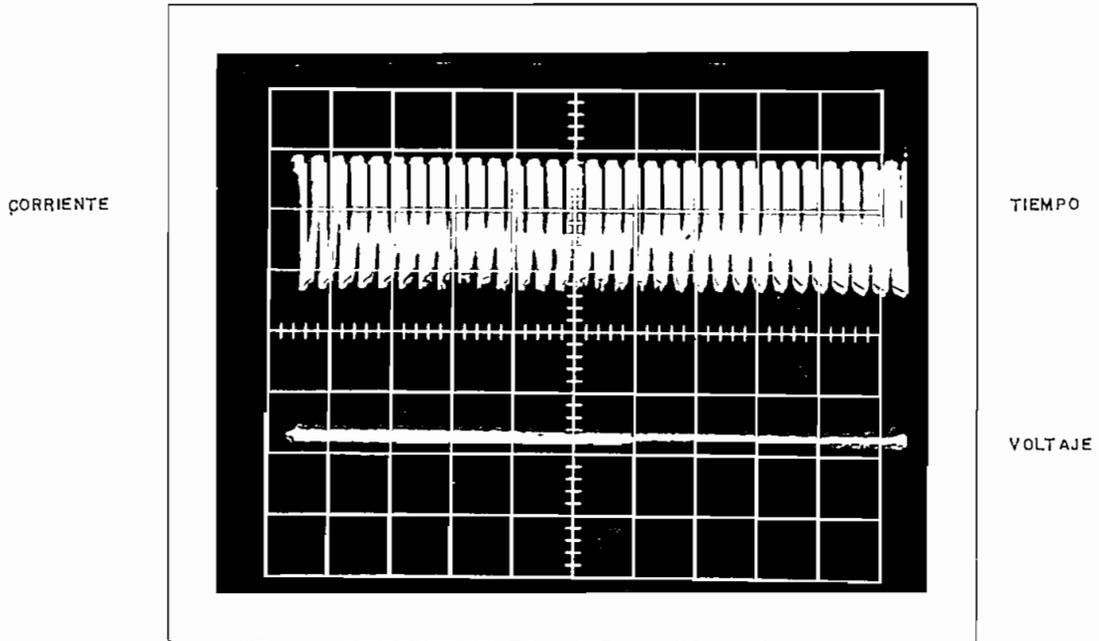


Foto 3.06

Escalas:

Voltaje: 1 voltio/div.

Corriente: 0.1 A/div.

Tiempo: 50 mseg/div.

Observando las fotografías, podemos decir que:

- Los capacitores conectados a la máquina suministran la

excitación requerida por el circuito magnético de la máquina.

- La máquina sigue funcionando con su velocidad sincrónica.
- La tensión en bornes de la máquina adquiere un valor reducido.

En el primer instante de perder la excitación - se produce un decremento de la corriente, pero después, - éste comienza a crecer por la corriente que suministra el banco de capacitores.

No se ha procedido a conectar la resistencia al generador, por cuanto este experimento se encuentra bastante limitado y no se sabría precisar el valor de resistencia para que se produzca las condiciones de autoexcitación.

En lo que se refiere a los valores que Potencia activa, éstos no se han podido tomar por la naturaleza de la carga. En cuanto a la reactiva no se poseen instrumentos para medirla.

Por lo observado en la práctica, podemos concluir que la teoría tiene relación con lo experimentado.

CAPITULO CUARTO

DETECCION Y PROTECCION CONTRA PERDIDA DE EXCITACION

- 4.1.- JUSTIFICACION.- Este capítulo se ve justificado por la necesidad de conocer un método - que permita detectar con gran exactitud la pérdida de excitación de la máquina sincrónica.
- 4.2.- PROPOSITOS DE LA PROTECCION.- La protección debe estar encaminada a atender básicamente los siguientes puntos fundamentales:
- Minimizar el daño de la máquina y los equipos asociados a ella.
  - Reducir la probabilidad de tener un bajo nivel de voltaje en el sistema, así como también evitar la inestabilidad del mismo.
  - Detectar la pérdida de excitación sin responder a cambios de carga u a transitorios que no produzca o lleguen a causar la pérdida de estabilidad de la máquina.
- 4.3.- FORMA DE PROTECCION.- Bajo la premisa de que es conveniente proveer a la máquina sincrónica de un adecuado sistema de protección, con

tra pérdida de excitación, se han diseñado relés para proteger varios grados de anormalidad debidos a baja excitación como:

- Dar alarma al operador, cuando se produce por cualquier motivo una baja excitación, la misma que podría dañar a la máquina o traer como resultado la pérdida de estabilidad del sistema.
- Dar alarma al operador para condiciones de pérdida de campo con el propósito de corregir si es posible, la causa de dicha anormalidad, y
- Producir la apertura de los interruptores principales y de campo cuando existe pérdida de estabilidad del sistema.

Entre los tipos de relés que se utilizan para este tipo de protección, existen relés para conexión entre fase y neutro y otros para conexión entre fases.

Los relés para conexión entre fases tienen como desventaja que operan para ciertas variaciones de carga y pérdida de tensión, lo que motiva una salida de la máquina del tipo no deseado. (15)

Para realizar la protección contra pérdida de -

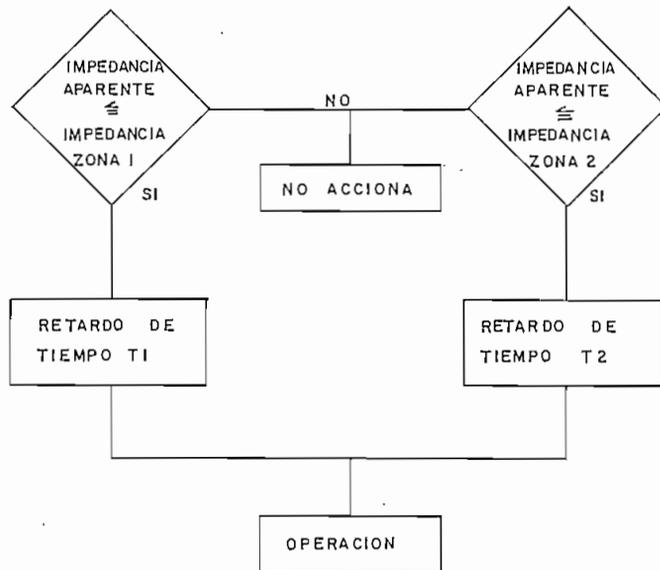
excitación de la máquina síncrona, es necesario tener presente que muchas molestias causadas por transitorios en el sistema pueden y resultan como impedancias aparentes presentadas al relé encargado de detectar la pérdida de excitación. En la mayoría de los casos estas impedancias aparentes pueden ser similares a las impedancias presentadas durante una verdadera pérdida de excitación.

De lo anterior se deduce que el relé que conviene para realizar la protección contra la pérdida de excitación de una máquina síncrona es el relé tipo MHO, por cuanto este relé a más de tener la capacidad de detectar una variedad de fallas en el sistema de excitación, puede distinguir entre fallas debidas a la pérdida de excitación y otras condiciones de operación. (16)\* Sin embargo, podemos decir que una demora de tiempo prevendrá al registrador de pérdida de excitación de operar indebidamente durante transitorios, de ordinario se suele recomendar una demora de 1.5 a 2.0 seg. (17)\*

Con el propósito de tener una mayor seguridad contra una falsa operación del relé por operaciones indebidas del sistema, la protección para máquinas cargadas completamente y con pérdida de excitación, puede ser llevada a efecto usando un relé de doble zona o de impedancia y

que además tenga una característica MHO. El alcance de la primera zona es ajustable y aproximadamente igual a 1.0 p.u de la impedancia del generador y con un retardo de tiempo de 0.3 a 0.4 segundos, en tanto que el alcance de la segunda zona es un poco más alto que la reactancia sincrónica  $x_d$  y con un retardo de tiempo de 1.5 a 2.0 segundos.

La lógica recomendada se muestra en la figura - (4.01) y las características del relé en la figura (4.02) Cabe mencionar que la necesidad de una mayor seguridad dependerá de la estabilidad de la máquina y de la capacidad de potencia reactiva del sistema. ( 16 )<sup>\*</sup>



T1 = 0.3 a 0.4 segundos  
T2 = 1.5 a 2.0 segundos  
Alcance primera zona  $\gg$  1 pu  
Alcance segunda zona  $\gg$   $x_d$

Fig. 4.01 Lógica recomendada para protección contra pérdida de excitación

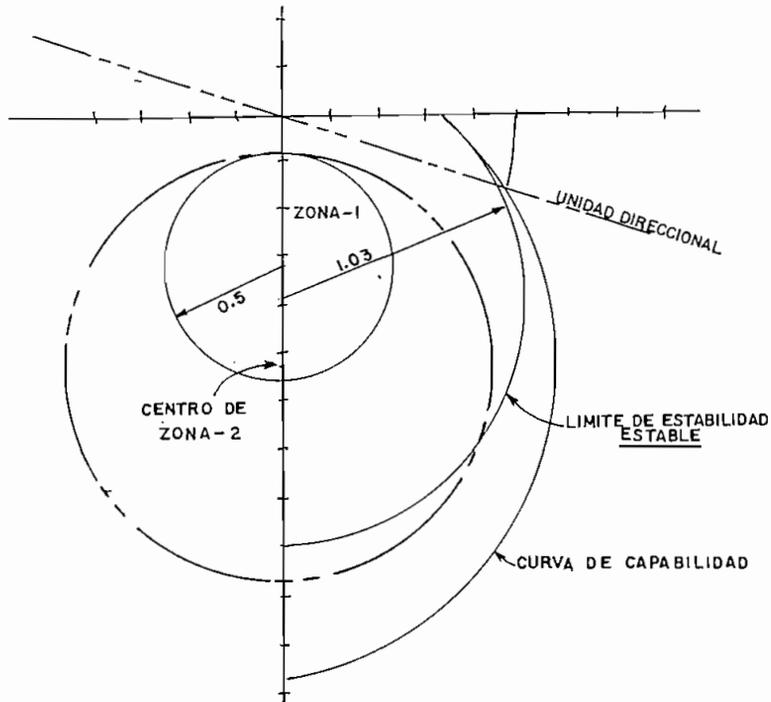


Fig. 4.02. Características del Relé de doble zona para pérdida de excitación.

Es importante y conveniente supervisar el nivel de voltaje terminal de la máquina, cuando ésta ha perdido su excitación, ya que la superación del voltaje terminal de la máquina es perjudicial para la operación del relé de pérdida de excitación.

Resumiendo, se puede decir que la protección contra pérdida de excitación de un generador puede ser detectada sin riesgo de una falsa operación de los relés por estados ocasionados por molestias o perturbaciones del sistema mediante un relé que mida la impedancia de la máquina y necesariamente dicho relé debe tener la característica mostrada en la figura (4.02)

El balance del relé debe ser igual a  $\frac{1}{2}(x_d)$ , esto es a la mitad de la reactancia transitoria en eje directo del generador y el diámetro del círculo igual a la reactancia en eje directo del generador. Además es necesario destacar la necesidad de que el relé tenga un retardo de tiempo, el mismo que no debe exceder al tiempo límite de estabilidad y capacidad térmica de la máquina. (16)\*

Es preciso tener en cuenta que los relés utilizados en la protección de pérdida de excitación no deben depender de la protección de sobrepaso de la máquina.

4.4.- METODO DE PROTECCION. ( 15 )\*- Un método utilizado para realizar la protección contra pérdida de excitación de un generador sincrónico, es aquel que utiliza un relé de campo que en general posee lo siguiente:

- Una unidad direccional
- Una unidad MHO descentrada
- Una unidad instantánea de baja tensión.

La operación del relé descrito anteriormente, con referencia al diagrama R-x de la figura (4.03) es la siguiente:

La unidad direccional cierra los contactos, cuan-

do la potencia reactiva fluye hacia la máquina, en tanto que la unidad de impedancia cierra sus contactos cuando la impedancia de la máquina vista desde sus terminales, es menor que un valor predeterminado. Cuando se produce la pérdida de excitación en el generador sincrónico, los valores de la impedancia se mueven hacia el interior de la característica de operación del relé y el circuito puede utilizarse ya sea para hacer sonar una alarma o - provocar la salida de la máquina.

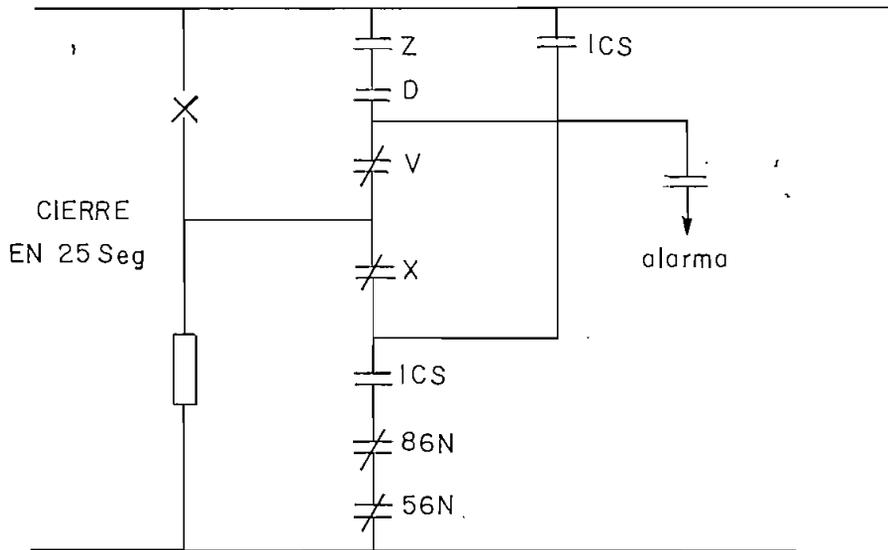


Figura 4.03

Teniendo presente que la reducción de la excitación produce una caída de tensión en los terminales de la máquina, por el flujo de potencia reactiva desde el siste-

ma hacia la máquina, es necesario tener presente que una - excesiva caída de tensión puede hacer inestable al sistema, de allí que la unidad de baja tensión deberá calibrarse a un valor que impida la pérdida de estabilidad del sistema, y éste valor no puede determinarse sin haber hecho un estudio de estabilidad transitoria, sin embargo la experiencia nos indica cual es el valor de esa tensión crítica, entonces el relé de baja tensión deberá calibrarse para que opere antes de que llegue a este valor crítico.

La operación de la unidad direccional y de impedancia sacará de servicio a la máquina.

El relé x del tipo telefónico conectado en paralelo con tres contactos en serie y sirve para dar un retardo de tiempo de aproximadamente 15 Hz antes de que se energice el circuito de disparo.

El relé de pérdida de campo deberá seguir aproximadamente la característica de la máquina. En general, puede decirse que existen dos zonas de protección, una que opera con retardo de 0.25 segundos y la otra más amplia para protección de pérdidas parciales de campo, la misma que puede hacer sonar una alarma primero y luego sacar de servicio a la misma.

Las impedancias aparentes presentadas a las terminales de la máquina sincrónica, cuando ésta ha perdido su excitación son las siguientes:

TRANSITORIO	VARIACION DE IMPEDANCIA				
Foto N. 3.01	20	28.5	17.3	13	-
Foto N. 3.011	19.6	33.3	17.3	13	
Foto N. 3.012	19.6	33.3	17.3	18.6	
Foto N. 3.013	40	25	20	17.6	

Los datos del generador que se utilizó para el desarrollo del experimento de pérdida de excitación son los siguientes:

GENERADOR SINCRONICO DE POLOS SALIENTES					
Voltaje	Corriente	potencia Aparente	Factor de Potencia	Velocidad	Frecuencia
230 V	8.7 A	3.5 KVA	0.8	1.800 r.p.m.	60 Hz

CAPITULO QUINTO

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones son las siguientes:

- 1.- Dependiendo del tamaño del generador, en relación con el tamaño del sistema al cual está conectado, una operación sin excitación puede producir una caída del voltaje del sistema.
- 2.- En contraste a lo anterior si el generador se conecta a un sistema muy fuerte, de tal manera que los requerimientos de excitación del generador, operando asincrónicamente puede suministrarse del sistema, no se produce depresión del voltaje, pero el rotor puede ser dañado dentro de un muy corto periodo de tiempo, o por causa de las corrientes extremadamente altas inducidas dentro del cuerpo del rotor.
- 3.- El generador que ha perdido su excitación continúa entregando potencia activa al sistema.
- 4.- La pérdida de excitación en un generador sincrónico produce inestabilidad del sistema al cual está conectado.

- 5.- Los devanados de un generador sincrónico se ven sometidos a calentamiento cuando éste ha perdido su excitación.
- 6.- Las máquinas de polos salientes pueden funcionar sin excitación, siempre y cuando la susceptancia de la carga, capacitiva, esté comprendida entre las admitancias sincrónicas transversal y longitudinal de la máquina.

$$\frac{1}{X_d} < CW < \frac{1}{X_q}$$

- 7.- Al conectar a un generador de polos salientes una línea muy larga que se encuentre abierta al extremo, la carga capacitiva que constituye la línea puede cumplir las condiciones de autoexcitación y generar en la máquina una tensión mucho mayor que la tensión nominal y además, no controlable.
- 8.- Se usa este régimen asincrónico así sea sólo durante el tiempo de traspaso a la excitatriz de reserva, lo que permite evitar en la mayoría de las cosas que se detengan los generadores; pero para esto se debe observar que:

- La carga activa debe disminuirse en un 50.70% de la nominal; y
- El tiempo que dura el régimen asincrónico no debe ser mayor que 30 minutos para los generadores con refrigeración indirecta y 15 minutos para las máquinas de otro tipo.

- 9.- La pérdida de excitación de un generador puede detectarse sin riesgo de un disparo no deseado por medio de un relés MHO que mida la impedancia de la máquina; además, el relé debe tener incorporado un retardo de tiempo, el mismo que no debe exceder el tiempo límite de estabilidad o la capacidad térmica de la máquina.
- 10.- Si un operador restaura la excitación en el tiempo no adecuado y sin los procedimientos correctos, él puede causar giros violentos de la unidad y una posible pérdida de sincronización.
- 11.- Al estar conectado un banco de capacitores a una máquina sincrónica, la corriente de descarga de éstos mantiene un cierto campo magnético en las bobinas de la máquina, cuando en la máquina sincrónica se ha producido la pérdida de excitación.

Si los capacitores conectados a la máquina están excedidos de potencia reactiva, la tensión en bornes puede alcanzar valores más elevados que la tensión nominal de la máquina, lo que pone en peligro tanto el aislamiento de la máquina, como de los capacitores.

- 12.- El banco o los capacitores conectados a la máquina - sincrónica no debe exceder las necesidades de potencia reactiva de la máquina para la marcha en vacío.
  
- 13.- Durante el funcionamiento asincrónico de la máquina - sincrónica se produce cambio del ángulo de defasaje - entre Voltaje y corriente, como lo podemos notar en las fotografías de funcionamiento asincrónico.

### RECOMENDACIONES

El fenómeno es demasiado interesante y por lo tanto, digno de que mediante una investigación más profunda se pueda llegar a presentar una simulación del fenómeno en la computadora.

Tomar el tema de protección del fenómeno para desarrollarlo como tema de una tesis.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- MANUEL CORTES, Máquinas sincrónicas y motores de C.A. de colector, Editores Técnicos Asociados S.A., Barcelona, Primera Edición 1.977.
- 2.- RALPH R. LAWRENCE, Principles of Alternating Current Machinery, Mac Graw Hill Book Company Inc., New York, 1.953.
- 3.- Ing. ARNOLD WAGNER, Máquinas Eléctricas, Editorial - Gustavo Gili S.A., Barcelona.
- 4.- ROBERT ROSEMBERG, Reparación de Motores Eléctricos, - Editorial Gustavo Gili S.A., Barcelona.
- 5.- MOLLER - WERR, Electrotecnia general y aplicada. Máquinas de corriente continua y máquinas de corriente alterna, Editorial Labor S.A., Segunda Edición 1.964.
- 6.- Ing. MENTOR POVEDA, Apuntes de clase durante el curso de Máquinas sincrónicas, dictado en la E.P.N., 1.976.
- 7.- ALEXANDER LANGSDORF, Teoría de las Máquinas de Corriente Alterna, Mc Graw Hill, Segunda Edición, 1.971.

- 8.- OLLE I. ELGERD, Electrical Energy Systems Theory, -  
Mc Graw Hill Company, New York.
- 9.- PARK, Transformation of Park, AIEE Transactions. Vo-  
lumen 48, pp. 716, 1.929.
- 10.- Ing. EDUARDO FLORES, Apuntes de clase, Graduado en -  
la URRS.
- 11.- The Influence de Generator Loss of Excitation on Bulk  
Power System Reliability, IEEE Transactions on Power  
Apparatus and systems. Volumen Pas 94, N<sup>o</sup>. 5, pp.  
1.473 - 1.479, September/October, 1.975.
- 12.- John Berdy, Loss of Excitation Protection for modern  
Synchrnous Generators, IEEE Transactions on Power -  
Apparatus and Systems. Vol. Pas - 94, N<sup>o</sup>. 5. pp.-  
1.457 - 1.460. September/October, 1.975.

BIBLIOGRAFIA ADICIONAL

- 13.- G. E. TAYLOR, Trip when excitation is lost, Electrical world, New York, pp. 96-97, October, 5, 1.953.
- 14.- BOBO SHOUGLUND, Wagner, Performance of excitation systems under abnormal conditions, IEEE Transactions, pp. 547, February 1.968.
- 15.- E. L. MICHELSON, L. F. LISCHER, Generator Stability at low excitation, Vol. 67, pp. 1-9, 1.948.
- 16.- C. CONCORDIA, M. TEMOSHOK, Resynchronizing of Generators, AIEE Transactions, Vol. 66, pp. 1.512-1.518, - 1.947.
- 17.- VENICOV B. A.- "Procesos Transitorios Electrodinámicos" - "Energía".- Moscú, 1.973.
- 18.- GRUDINSKIY P. G. y otros. "Explotación Técnica del Equipo Principal de una Central Eléctrica".- "Energía" Moscú, 1.974.
- 19.- VASILIEV A. A.- "Parte Eléctrica de las Centrales Eléctricas".- "Energía", Moscú, 1.972.