

16 MAYO 1972
INGRESADO A INVENTARIO CON
ORD. NO. 1576

**PRUEBAS DE LABORATORIO
DE
MAQUINARIA SINCRONICA**

TESIS DE GRADO
para optar el Título de
INGENIERO EN ELECTRICIDAD



SECRETARIA

**Escuela Superior
Politécnica del Litoral**

POR

Diógenes Martillo Grunauer

PRUEBAS DE LABORATORIO
DE MAQUINARIA SINCRONICA

PRUEBAS DE LABORATORIO
DE

TESIS DE GRADO PARA OPTAR
EL TITULO DE INGENIERO EN
ELECTRICIDAD



SECRETARIA

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL

Por **DIOGENES MARTILLO GRUNAUER**

Guayaquil, 20 de Enero de 1.972

La responsabilidad por los hechos,
ideas y doctrinas expuestas en es-
ta tesis corresponden exclusivamen-
te al autor.

(Artículo Sexto del Reglamento de
Exámenes y Titulos Profesionales
de la Escuela Superior Politecnica
del Litoral.)



SECRETARIA

DIOGENES MARTILLO GRUNAUER

Guayaquil, 20 de Enero de 1.972

AUTOR

Peterson D.

DIRECTOR DE TESIS

W. H. ...

PROFESOR

PROFESOR

PROFESOR

Dejo expreso mi agradecimiento a todos los que integran el Departamento de Ingeniería Eléctrica, y en especial al Ing. Gustavo Galindo, por el valioso aporte prestado para la realización de esta tesis.

A MIS PADRES

El Patrimonio Intelectual de esta
Tesis de Grado corresponde a la
Escuela Superior Politécnica del
Litoral.

	pag.
I.- INTRODUCCION	1
II.- DETERMINACION DE LAS PRUEBAS A REALIZARSE. . . 3	
III.- ESTUDIO TEORICO DE CADA PRUEBA	
PRUEBA Nº 1 (parámetros)	
a.- Sistemas de Coordenadas de dos ejes . . . 8	
b.- Servicio Estacionario:	
Reactancia Sincrónica	13
Diagrama Fasorial	18
Curva Característica de Vacío	22
Curva de Cortocircuito	24
Curva de Factor de Potencia Cero	28
PRUEBA Nº 2 (parámetros)	
a.- Servicio No Estacionario	
Proceso de Cortocircuito	33
Reactancia Transiente y Subtransiente.	36
Reactancia de Secuencia Negativa y Cero	45
b.- Constantes de Tiempo.	50
PRUEBA Nº 3 (conexión de los alternadores sincrónicos a la red)	
a.- Generalidades	56
b.- Puesta en Paralelo de los Alternadores	
Lámparas de Sincronización	57
Sincronoscopio	60
Autosincronización	61
c.- Division de la Carga entre Alternado- res en Paralelo	63

PRUEBA N.º 4 (La estabilidad en las máquinas
sincrónicas)

a.- Características del Angulo de Potencia. . .	70
b.- Capacidad de Sobrecarga Estática	75
c.- Límite de Potencia Estática	81

IV.- CONSTRUCCION DE CADA PRUEBA (hojas)

a.- Objeto	
b.- Proceso y Diagrama de Conexión	
c.- Resultados y Cálculos	

V.- CONCLUSIONES

a.- Conclusiones Generales	87
b.- Observaciones de cada Prueba	88

La mayoría de los libros técnicos son función de una necesidad específica en alguna actividad humana. Considerando el nuevo y creciente campo de aplicación de las máquinas sincrónicas, tanto los estudiantes como los profesores y quienes practican esta especialidad, necesitan un libro de referencia que contenga información y prácticas de laboratorio

Gran parte del contenido de esta obra, surgió de la idea de tratar de llenar en parte las necesidades a las que se ve abocado, tanto el que enseña como el que aprende, la teoría de las maquinas sincrónicas.

La obra está destinada a lectores y estudiantes que tienen un conocimiento básico de maquinaria eléctrica en general.

La tesis tiene especial aplicación en la comprensión de los problemas tratados en la materia de Estabilidad, que se estudia en los años superiores del curso de Potencia en la Escuela Superior Politécnica del Litoral, por lo que se ha establecido un ciclo de cuatro pruebas con la intención de dar al estudiante la oportunidad de familiarizarse con el trabajo estable de las máquinas sincrónicas, la determinación de sus curvas características, las condiciones de sincronización a una red y los métodos para ello y el conocimiento de la estabilidad

estática en el servicio en paralelo.

El tema PRUEBAS DE LABORATORIO DE MAQUINARIA SINCRONICA, llegó a materializarse en virtud de las ventajas que su aplicación ofrece. Entre estas ventajas podemos destacar las siguientes:

- 1.- La enseñanza práctica estimula y orienta al estudiante hacia un conocimiento basado en la comprobación.
- 2.- La enseñanza práctica es más objetiva por lo que su asimilación es más rápida y eficiente.
- 3.- La enseñanza práctica da al maestro la oportunidad de comprobar lo enseñado y al alumno de ratificar o rectificar lo aprendido. Y, finalmente.
- 4.- La enseñanza práctica permite que el estudiante se familiarice con los diferentes mecanismos y aparatos que en una u otra forma se harán presentes en su vida profesional

A REALIZARSE

Las pruebas, que se llevarán a efecto de acuerdo a la orientación de esta tesis, han sido clasificadas en cuatro grupos denominadas Prueba N° 1, Prueba N° 2, etc. A su vez cada prueba consta de algunos trabajos de Laboratorio que los he llamado Experiencias las que pertenecen a determinada prueba de acuerdo a las características que las definen.

Estudiemos en su aspecto más general a cada una de las pruebas.

Prueba N° 1.-Con esta prueba se dan a conocer los parámetros de la máquina sincrónica en las condiciones de servicio estacionario. Consta de cuatro trabajos que los señalamos a continuación.

EXPERIENCIA N° 1

Medición de las reactancias:

X_s .- reactancia sincrónica.

X_d .- " " de eje directo.

X_q .- " " " " en cuadratura

EXPERIENCIA N° 2

Obtención de la curva característica de saturación.

$$V = F(I_f)$$

EXPERIENCIA N° 3

Obtención de la curva de cortocircuito.

$$I = F(I_f)$$

EXPERIENCIA N° 4

Obtención de la curva de factor de potencia cero

la máquina sincrónica, que se manifiestan en el servicio no estacionario. Consta de tres prácticas que las indicamos a continuación.

EXPERIENCIA N° 5

Medición de las reactancias sincrónicas:

X_d'' .- reactancia subtransiente de eje directo

X_q'' .- reactancia subtransiente de eje en cuadratura

EXPERIENCIA N° 6

Medición de la reactancia:

X_2 .- reactancia de secuencia negativa

EXPERIENCIA N° 7

Medición de la reactancia:

X_0 .- reactancia de secuencia cero

Prueba N° 3.- Esta prueba trata de la sincronización de una máquina con un sistema que se encuentra en operación normal de carga. Se presentan para el caso tres experiencias.

EXPERIENCIA N° 8

Conexión de un alternador sincrónico a la red por el método de las lámparas (apagadas).

EXPERIENCIA N° 9

Conexión de un alternador sincrónico a la red por el método del sincronoscopio.

EXPERIENCIA N° 10

Conexión de un alternador sincrónico a la red por el método de la autosincronización.

Prueba N° 4.- Esta prueba pertenece al estudio de la estabilidad propiamente , ya que en su desarrollo podremos observar la relación que existe entre el ángulo de potencia y la carga aplicada a la máquina.

EXPERIENCIA N° 11

Medición del ángulo de potencia.

EXPERIENCIA N° 12

Obtención de la curva de potencia para las condiciones :

$$V = \text{Cte.}$$

$$E_0 = \text{Variable}$$

$$\vartheta = \text{Variable}$$

III.- ESTUDIO TEORICO DE CADA
PRUEBA

PRUEBA N° 1
PARAMETROS

FINALIDAD

El cometido de esta prueba es hacer conocer prácticamente los parámetros de las máquinas sincrónicas en sus diferentes estados de operación en servicio estacionario incluyendo la elaboración de diagramas y esquemas de operación para la verificación de las diversas experiencias.

FUNDAMENTOS

a) Sistema de coordenadas de dos ejes

(Transformación de Park)

La base de toda investigación teórica moderna sobre máquinas sincrónicas es la teoría de los dos ejes. Con ella se pueden tratar tanto los procesos estacionarios como los no estacionarios.

Para simplificar el procedimiento y entrar directamente al sistema de dos ejes - Transformación de Park - se ha establecido una serie de condiciones auxiliares de las cuales las más importante son:

- 1.- Inexistencia de saturación
- 2.- " " histéresis
- 3.- " " de los efectos de las corrientes parásitas y de las bobinas de amortiguamiento
- 4.- Comportamiento constante respecto a la temperatura
- 5.- Corriente sinusoidal perfecta.

El método Park consiste en una sustitución de va-

riables en las ecuaciones de las máquinas sincrónicas para obtener un conjunto de corrientes (I), voltajes (V) y flujos (ϕ) ficticio, deducido de corrientes, voltajes y flujos conocidos, respectivamente, y expresar las ecuaciones en función de estas nuevas variables.

Las ecuaciones con sus nuevas variables pueden ser resueltas como función de tiempo ofreciendo como resultado que las cantidades eléctricas actuales puedan ser resueltas como función de tiempo y referidas a dos ejes.

La línea imaginaria que pasando por la mitad del hierro une los polos norte y sur de cada par es el Eje Directo (d).

La línea imaginaria que pasando por la mitad de los ejes cruza el máximo entrehierro es el Eje en Cuadratura (q).

La figura (1-1), muestra la relación entre un sistema trifásico (corriente, voltaje, etc.) y los ejes directo y en cuadratura para el caso de una máquina de dos polos. θ nos indica la separación angular que existe entre el vector de la fase a y el eje directo.

Considerando la figura (1-1) pasamos a escribir las igualdades para corriente de armadura en función de I_d , I_q , e I_o de tal forma que:

$$I_a = I_d \cos \theta - I_q \sin \theta + I_o$$

$$I_b = I_d \cos(\theta - 120) - I_q \sin(\theta - 120) + I_o \quad (A)$$

Por otro lado, si multiplicamos I_a , I_b e I_c por $\cos\theta$, $\cos(\theta-120)$ y $\cos(\theta+120)$, respectivamente luego sumamos y si recordamos que:

$$\cos^2\theta + \cos^2(\theta-120) + \cos^2(\theta+120) = 3/2$$

$$\sin^2\theta + \sin^2(\theta-120) + \sin^2(\theta+120) = 3/2$$

$$\begin{aligned} \sin\theta\cos\theta + \sin(\theta-120)\cos(\theta-120) \\ + \sin(\theta+120)\cos(\theta+120) = 0 \end{aligned}$$

$$\cos\theta + \cos(\theta-120) + \cos(\theta+120) = 0$$

Obtenemos:

$$I_d = 2/3 [I_a \cos\theta + I_b \cos(\theta-120) + I_c \cos(\theta+120)]$$

Para obtener I_q se multiplica por $\sin\theta$, $\sin(\theta-120)$ y $\sin(\theta+120)$, respectivamente, y se procede igual que para I_d .

De la suma de I_a , I_b e I_c resulta I_o .

Resumiendo

$$I_d = 2/3 [I_a \cos\theta + I_b \cos(\theta-120) + I_c \cos(\theta+120)]$$

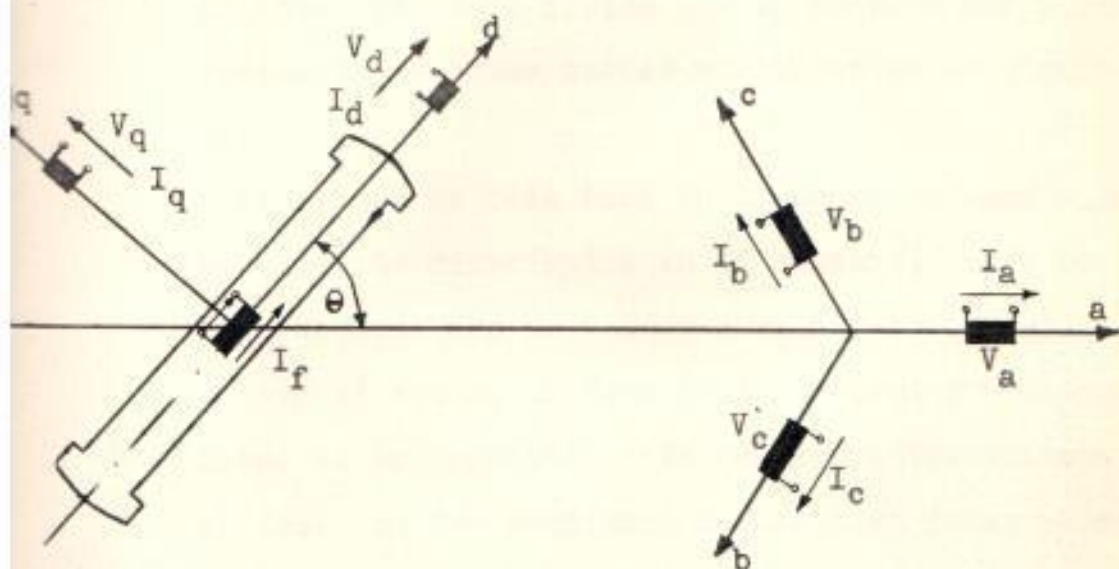
$$I_q = -2/3 [I_a \sin\theta + I_b \sin(\theta-120) + I_c \sin(\theta+120)] \quad (B)$$

$$I_o = 1/3 [I_a + I_b + I_c]$$

De los grupos de ecuaciones (A) y (B) podemos deducir las expresiones (C) y (D), respectivamente, que se las denomina "Matriz de Park" y nos sirve para referir las componentes, generalmente, trifásicas de corriente, voltaje y flujo a los ejes (d) y (q), y viceversa.

Rotor en
movimiento

Estator fijo



Esquema de la relación entre un sistema trifásico y el sistema de dos ejes.

FIGURA (1)

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 1 \\ \cos(\theta-120) & -\text{sen}(\theta-120) & 1 \\ \cos(\theta+120) & -\text{sen}(\theta+120) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \\ I_o \end{pmatrix} \quad (C)$$

$$\begin{pmatrix} I_d \\ I_q \\ I_o \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120) & \cos(\theta+120) \\ -\text{sen}\theta & -\text{sen}(\theta-120) & -\text{sen}(\theta+120) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} \quad (D)$$

La interpretación física que le podemos dar a la inclusión de estas nuevas variables es la siguiente:

" Si la fmm de cada fase en la armadura está sinusoidalmente distribuida en el espacio, puede ser representada por un vector cuya dirección está dada por el eje de la fase a que pertenece y su magnitud es proporcional a la corriente instantánea de fase. La fmm combinada de las tres fases puede, a su vez, ser representada por un vector que es la suma de las fmm de cada fase. Las proyecciones del vector combinado en los ejes directo (d) y en cuadratura (q) del campo determina los valores de fmm referidos a un nuevo sistema. "

Refiriendo a valores de corriente lo antes dicho resulta que:

I_d .- es una corriente instantánea que se origina en una bobina ficticia en el inducido que gira a la misma velocidad que este y permanece en tal posición que coincide su eje siempre con el eje directo del campo.

I_q .- es similar a I_d sino que actúa sobre un eje en cuadratura respecto al eje de ésta.

I_o .- es igual que el criterio usual de corriente de secuencia cero, excepto que es un valor instantáneo y definido en términos de corriente de fase instantánea.

- b) Servicio Estacionario: Reactancia Sincrónica.- Diagrama Fasorial.- Curvas Características de Vacío, Factor de Potencia Cero y Cortocircuito.

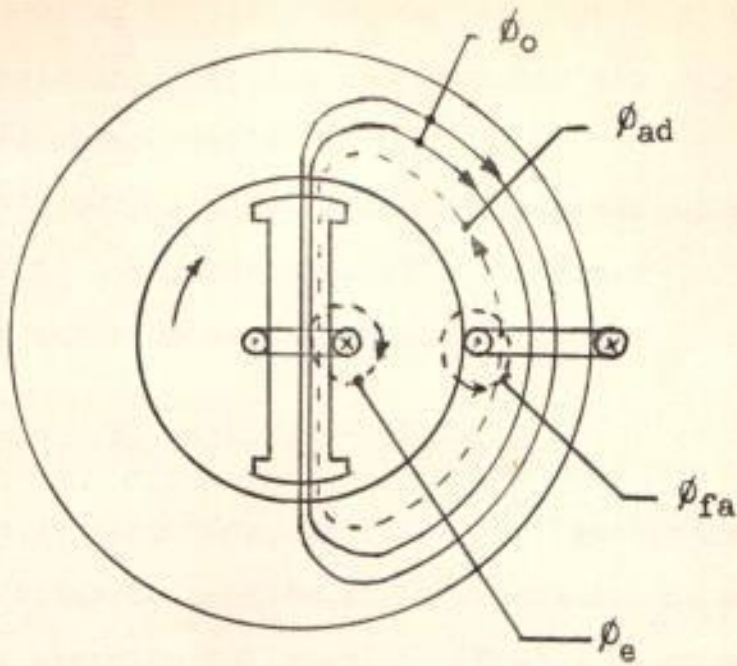
Reactancia Sincrónica

Para definir lo que es reactancia sincrónica consideremos los aspectos físicos de la distribución del flujo magnético correspondiente al funcionamiento sin carga y bajo un cortocircuito simétrico de una máquina.

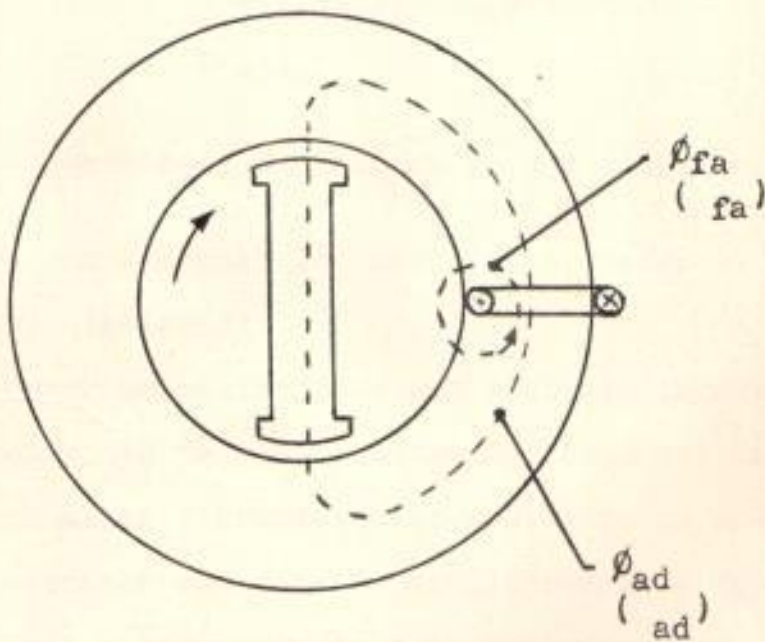
Para el caso tomemos solo una fase y mantengamos el cortocircuito un instante tal que la corriente de la fase representada alcance su valor máximo, es decir, cuando el flujo resultante de reacción del inducido esté sobre el eje de la fase dada. En estas condiciones el flujo del devanado de excitación (ϕ_o) induce en el devanado del estator la misma fem (E_o) que cuando la máquina funciona en vacío con la misma excitación y sin saturación, véase figura (2)

En cortocircuito la tensión en bornes de la máquina es cero por lo que la fem (E_o) estará equilibrada por la fem de reacción del inducido ($-jI_{ci}X_{ad}$) y la fem de dispersión ($-jI_dX_{fa}$) inducidas por flujo de

(a)



(b)



Camino recorrido por los flujos que actúan en una máquina sincrónica trifásica.

FIGURA (2)

reacción del inducido (ϕ_{ad} y flujo de dispersión (ϕ_{fa}) en el devanado del estator, respectivamente. La resistencia activa del devanado del inducido se estima despreciable.

Los flujos ϕ_{ad} y ϕ_{fa} son conjuntamente iguales al flujo ϕ_0 , pero de sentido contrario.

De lo anterior se deduce que:

$$E_0 - jI_d X_{ad} - jI_d X_{fa} = 0$$

Dicho de otro modo, la fem E_0 es igual a la suma de las caídas de tensión en la reactancia de eje directo de reacción del inducido (X_{ad}) y en la reactancia inductiva (X_{fa}), o sea,

$$\begin{aligned} E_0 &= -jI_d X_{ad} - jI_d X_{fa} \\ &= -jI_d (X_{ad} + X_{fa}) \\ &= -jI_d X_d \end{aligned}$$

X_d .- reactancia sincrónica de eje directo

Para complementar lo antes dicho veamos el experimento siguiente:

El rotor no excitado de una máquina sincrónica gira a velocidad de sincronismo impulsado por un motor, si en estas circunstancias aplicamos el devanado del estator una tensión equilibrada, de frecuencia nominal y secuencia de fase positiva, por el devanado circulará una corriente que crea campos magnéticos los cuales se cierran en circuitos de permeancias (Λ_{ad}) y (Λ_{fa}), ver figura (2-b), si el eje del polo coincide con el eje del campo de reacción del inducido. Estos campos magnéticos inducirán en el

estator las fem $-jI_d X_{ad}$ y $-jI_d X_{fa}$ que equilibran la tensión aplicada, y, por consiguiente:

$$V - jI_d X_{ad} - jI_d X_{fa} = 0$$

Es decir, la tensión aplicada es igual a la suma de las caídas de tensión en la reactancia inductiva de reacción del inducido y la reactancia de dispersión. De donde:

$$\begin{aligned} V &= jI_d (X_{ad} + X_{fa}) \\ &= jI_d X_d \end{aligned}$$

es decir,

$$I_d = \frac{V}{jX_d} = \frac{E}{jX_d}$$

Así pues, cuando se conmuta la máquina a un circuito con tensión V , el estator toma una corriente igual a la corriente sostenida de cortocircuito y una excitación que corresponde a la fem en vacío.

En el experimento considerado anteriormente, si el eje del polo es perpendicular al eje del campo de reacción del inducido, la máquina representará para la tensión aplicada una reactancia en cuadratura

$$X_q = X_{aq} + X_{fa}$$

La reactancia de dispersión (X_{fa}) es relativamente pequeña.

En las máquinas de polos salientes la reluctancia presentada a la fmm de reacción del inducido de eje directo es menor que la presentada a la reacción del inducido del eje en cuadratura, y por consiguiente, tendremos:

$$X_{ad} > X_{aq}$$

entonces, $X_d > X_q$

De la observación teórica y experimental se concluye que en las máquinas de rotor cilíndrico prácticamente la reluctancia no depende de la posición del eje de fmm de reacción del inducido y en consecuencia.

$$X_{ad} = X_{aq} = X_a$$

$$X_d = X_q$$

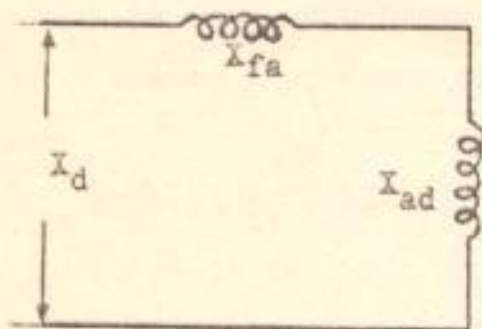
De donde,

$$X_s = X_{fa} + X_a$$

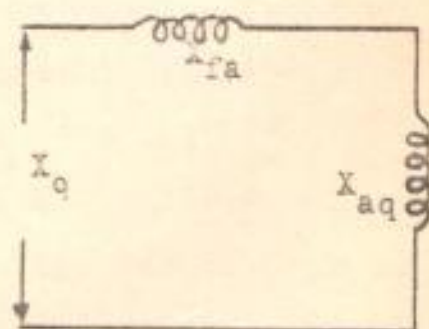
$$Z_s = R_a + jX_s \quad (R_a \neq 0)$$

X_s .- Reactancia Sincrónica

Z_s .- Impedancia "



X_d .-Reactancia Sincrónica de eje directo.



X_q .-Reactancia Sincrónica de eje en cuadratura.

Diagrama Fasorial

El diagrama de tensión de una máquina sincrónica es de mucha importancia para el análisis de las condiciones de trabajo ya que de él se puede obtener entre otras cosas:

- 1.- Porcentaje de la variación de la tensión del generador.
- 2.- Aumento de la tensión con disminución de la carga.
- 3.- Caída de tensión para la transición desde funcionamiento en vacío a funcionamiento con carga plena.
- 4.- Determinación de las condiciones de funcionamiento de la máquina sin aplicar realmente la carga (físicamente difícil cuando la máquina es de potencia grande).
- 5.- El ángulo de potencia (δ) entre la fem producida por el campo y la tensión entre los bornes.
- 6.- Las características fundamentales de funcionamiento o performance por medio del cálculo.

La diferencia vectorial entre E_o y V , depende del efecto de la reacción del inducido y de la caída de tensión en la resistencia activa y de la reactancia inductiva de dispersión del devanado del inducido. Al mismo tiempo debe considerarse que la reacción del inducido depende en gran parte de:

Tipo de la máquina (polos salientes, rotor cilíndrico)

Clase de carga (inductiva, activa o capacitiva)
Grado de simetría de la carga (equilibrada o desequilibrada).

Además, se debe tener en cuenta que, todas las fems y tensiones que participan como componentes en el diagrama de tensiones corresponden a su frecuencia fundamental, por lo tanto, todas las fems y tensiones deben ser resueltas previamente en armónicos y de cada uno de ellos tomarse su onda fundamental.

Construyamos el diagrama de fem de un generador sincrónico de rotor cilíndrico para el caso de carga inductiva.

$$0 < \psi < 90$$

Hacemos coincidir el vector de la tensión entre bornes con la dirección positiva del eje de coordenadas. Figura (3).

Trazamos el vector de corriente (I) retrasándolo de (V) un ángulo (φ). Luego se traza el vector de la fem (E_o) producida por el flujo de excitación (ϕ_o), adelantado respecto a (I) un ángulo (ψ). De acuerdo con la regla general (ϕ_o) adelanta a (E_o) en 90° .

La onda fundamental de la fmm de reacción del inducido (F_a) de un generador sincrónico gira en sincronismo con su rotor y crea una onda sinusoidal de flujo de reacción (ϕ_a) cuya fase coincide con la de la corriente (I) e induce en el devanado del estator una fem (E_a) cuya fase se retarda de la de (I) un ángulo de 90° .

Si X_a es la reactancia inductiva de la reacción del inducido,

$$E_a = -jIX_a.$$

De la suma vectorial de ϕ_o y ϕ_a se obtiene el vector resultante ϕ_o que realmente existe en el entrehierro del generador. Y de la suma de E_o con E_a el vector de fem resultante E_o en el devanado del estator. E_o es proporcional a ϕ_o y se retarda de éste en 90° .

Al igual que ϕ_o , existe un flujo de dispersión del devanado del estator (ϕ_{oa}), cuyo vector coincide con el de corriente (I), que crea en el devanado de del estator una fem de dispersión (E_{fa}) de frecuencia fundamental retardada de I en 90°

$$E_{fa} = -jIX_{fa}.$$

Hay que considerar también la fem E_r , cuya fase es opuesta a I.

$$E_r = -IR_a$$

X_{fa} .- reactancia de dispersión del devanado del estator.

R_a .- resistencia activa del devanado del estator.

La suma vectorial de las fems E_o , E_a , E_{fa} y E_r nos determina el vector V de la tensión existente entre los bornes del generador.

El ángulo φ está dado por los parámetros del circuito exterior al que es conectado el generador.

El vector V_c de la tensión de línea es opuesto al vector de tensión (V) del generador.

La figura (3-a) muestra el diagrama de fem para el funcionamiento con carga capacitiva.

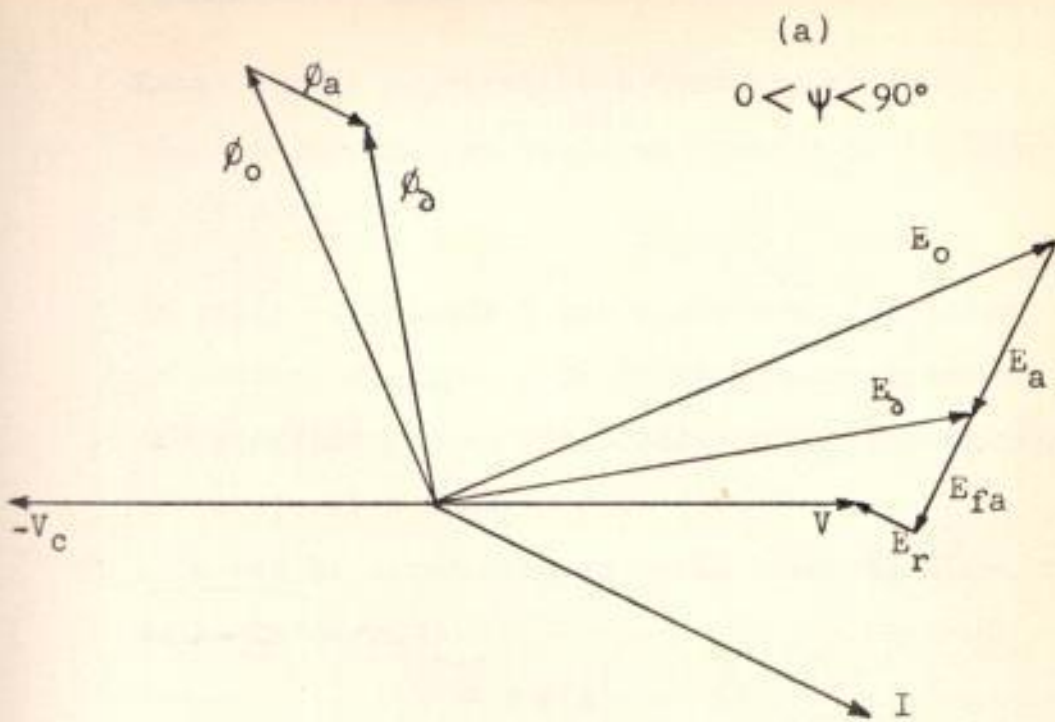


Diagrama de fem para carga inductiva.

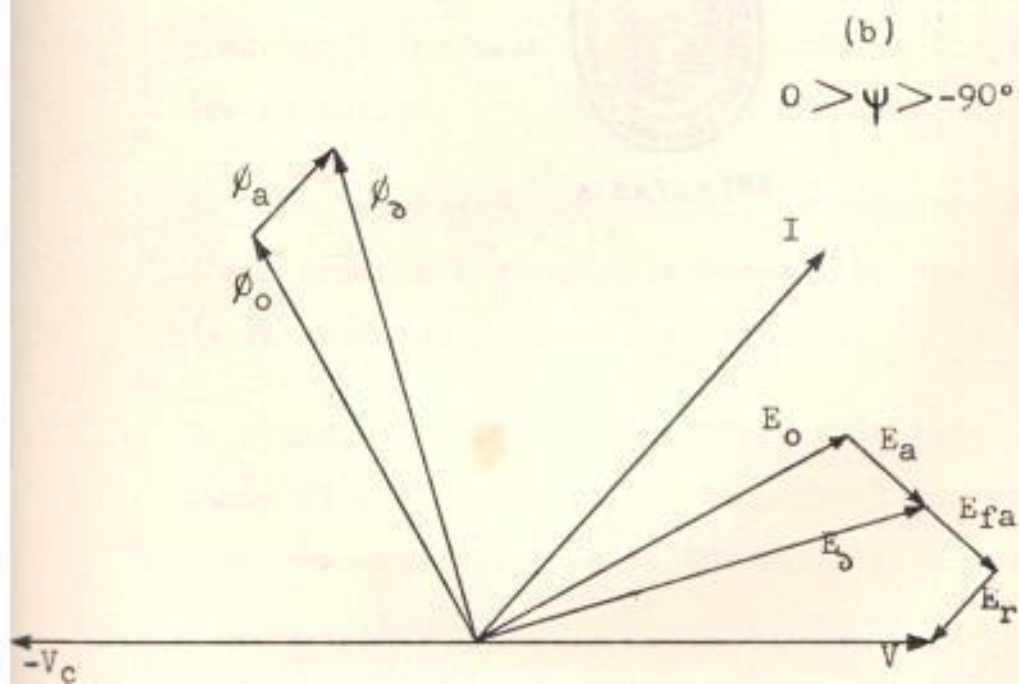


Diagrama de fem para carga capacitiva

FIGURA (3)

Estas curvas representan el voltaje en bornes de la máquina operando en vacío en función de la corriente de excitación.

En vacío el voltaje V que aparece en los bornes de la máquina es igual a la fuerza contraelectromotriz (E) generada por el flujo polar y por consiguiente proporcional a éste.

La curva de saturación en vacío tiene la misma forma de la curva

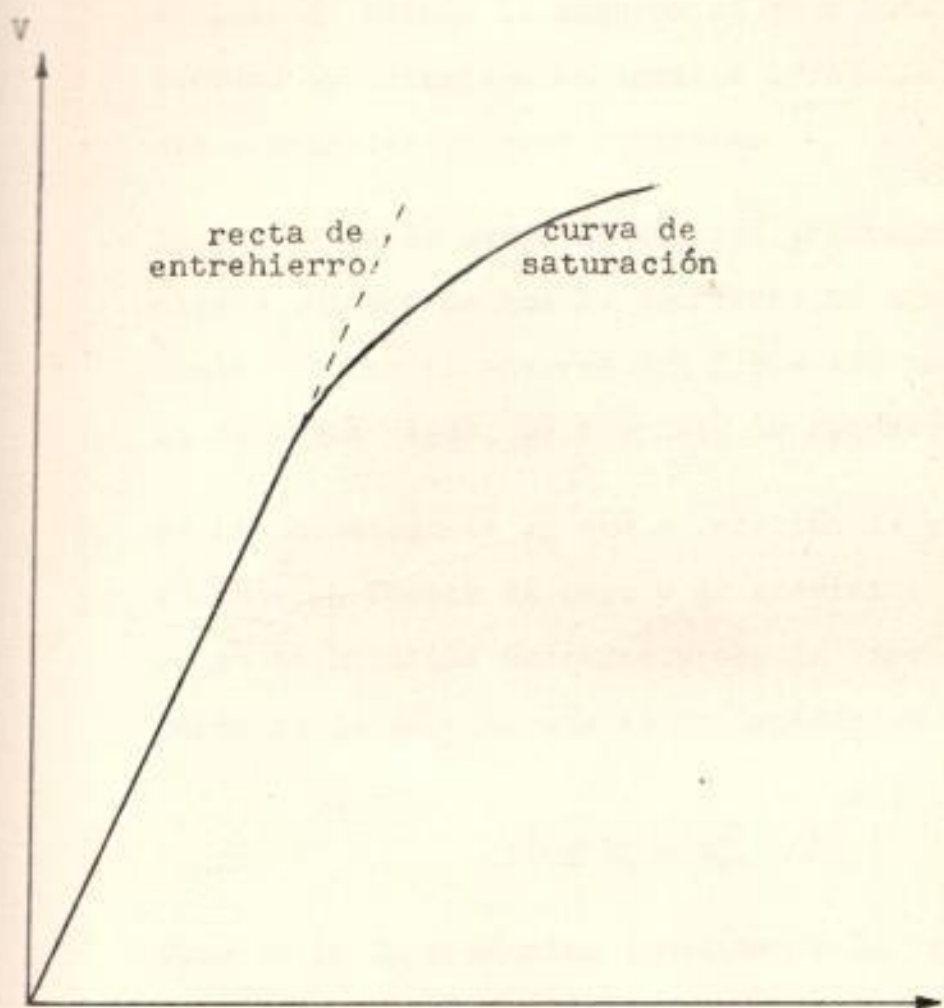
$$B = F(H)$$

de el circuito magnético.

Para obtener esta característica basta con hacer variar la corriente de excitación siempre en el mismo sentido, cuando la máquina gira a velocidad nominal, y anotar el voltaje (V) que se toma en los terminales de salida.

Hay que tener especial cuidado de mantener la velocidad constante durante la prueba, ya que el voltaje en vacío es proporcional a ella.

Se denomina recta de entrehierro a la línea trazada desde el origen tangente a la parte lineal de la curva de saturación en vacío. Ver figura (4)



Curva característica de saturación en vacío y
recta de entrehierro.

FIGURA (4)

Curvas de Cortocircuito

Son las curvas que representan la corriente de cada fase de la armadura en función de la corriente de excitación cuando la máquina se hace rotar a una velocidad aproximadamente igual a la nominal estando sus terminales en cortocircuito.

La corriente de campo se aumenta gradualmente teniendo cuidado de que la corriente de armadura alcance valores no mayores del 120 a 150 por ciento de la de plena carga, para evitar la saturación.

En las condiciones en que se efectúa la prueba el voltaje en bornas es cero y la corriente de armadura se ve limitada únicamente por la impedancia interna de la máquina que es la impedancia sincrónica

$$Z_s^2 = R_a^2 + X_s^2$$

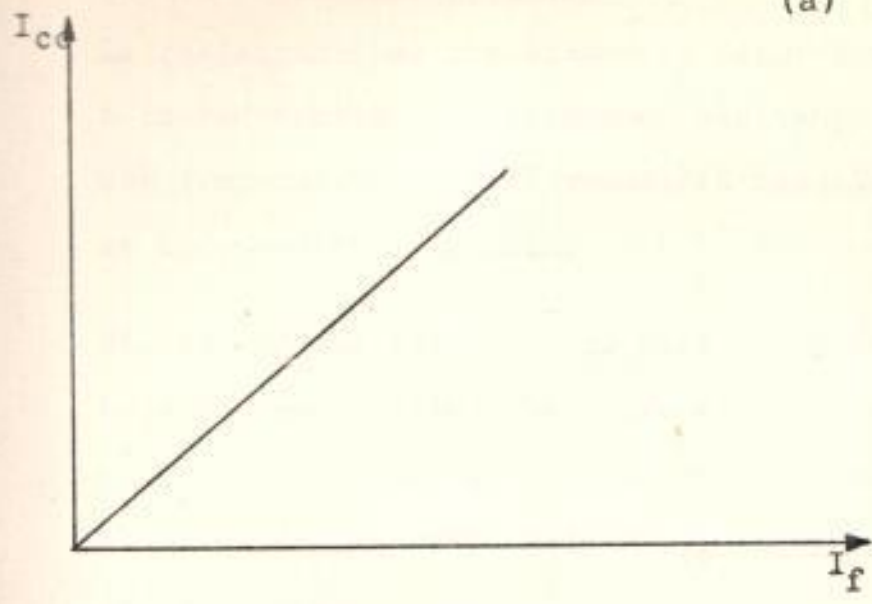
Como en la Z_s predomina fuertemente la reactancia sincrónica sobre la resistencia, la I de cortocircuito se atrasa respecto a la fem (E) en un ángulo cercano a 90° . Ver figura (5)

La fem (E) es proporcional a la corriente de excitación (I_f), la corriente de armadura es a su vez proporcional a E ,

$$I_{cc} = \frac{E}{Z_s}$$

entonces la característica de cortocircuito es una recta (dentro de los límites que se logran en la práctica).

(a)



Curva característica de cortocircuito.

(b)

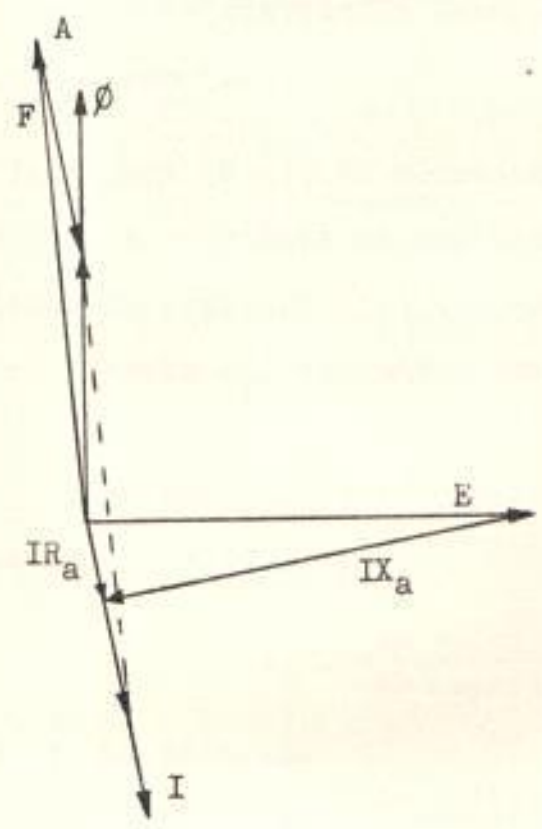


Diagrama fasorial en condiciones de cortocircuito.

FIGURA (5)

No es necesario que el ensayo se realice exactamente a la velocidad nominal.

La resistencia es prácticamente despreciable frente a la reactancia y considerando que tanto E como X_s son proporcionales a la velocidad deducimos que I_{cc} es independiente de ésta.

Sin embargo la velocidad no debe ser excesivamente baja ya que X_s disminuye proporcionalmente con ésta y por lo tanto la resistencia deja de ser despreciable frente a la reactancia e I_{cc} independiente de la velocidad.

La característica de saturación en vacío, la de entrehierro y la de cortocircuito permiten calcular la impedancia sincrónica saturada y no saturada, respectivamente.

En la figura (6-a), AB representa el voltaje en vacío con la corriente de excitación (I_{f1}). AD, la corriente de armadura (I_1) que se obtiene con la misma excitación I_{f1} estando la máquina en cortocircuito.

La Z_s saturada para una corriente de excitación I_{f1} está dada por la relación

$$Z_s = \frac{AB \text{ voltio}}{AD \text{ amperio}} .$$

Y la Z_s no saturada

$$Z_s = \frac{AC \text{ voltio}}{AD \text{ amperio}} .$$

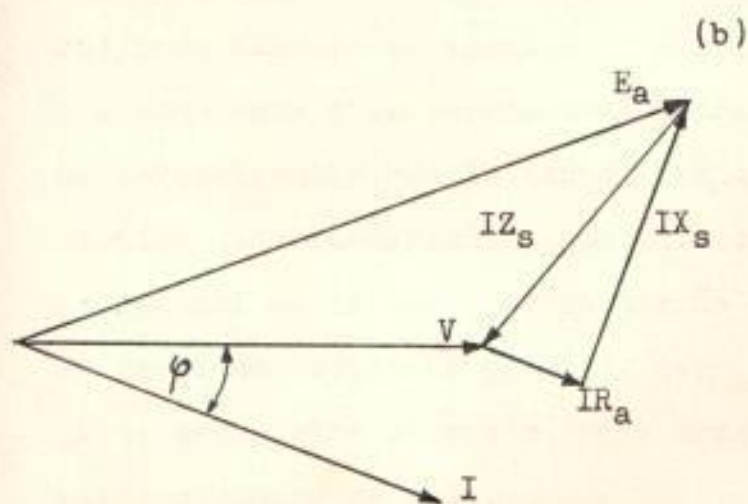
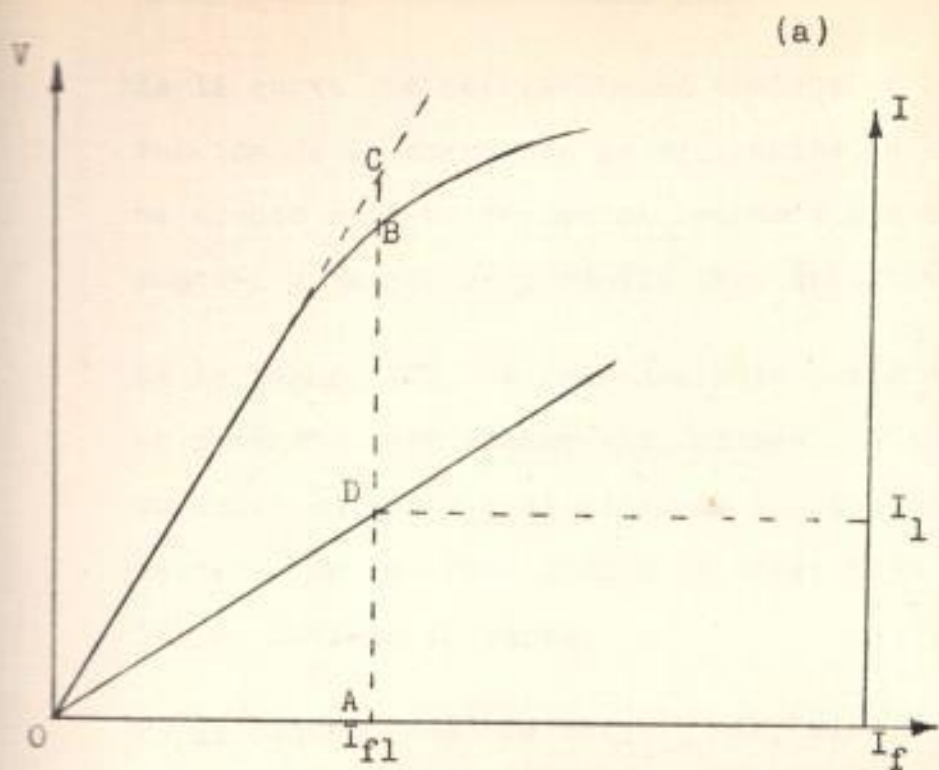


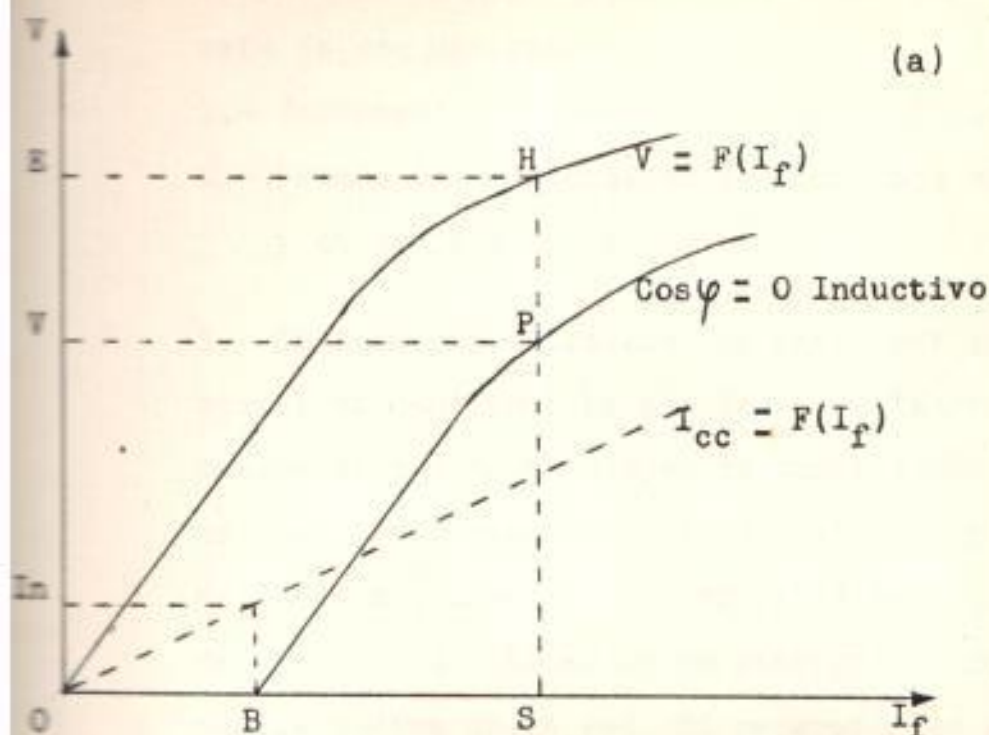
FIGURA (6)

Es la curva que representa el voltaje en bornes en función de la corriente de excitación de una máquina cuando ésta se encuentra operando con corriente nominal y factor de potencia cero inductivo.

En la figura (7), se representa la curva de factor de potencia cero incluyendo, además, la curva de saturación en vacío y el diagrama correspondiente de vectores en las condiciones de carga bajo las cuales se obtiene la curva.

En la figura (7-a) se observa que, para una excitación dada, la diferencia de ordenadas entre ambas curvas es prácticamente igual a la caída de tensión en la reactancia sincrónica. El trazo OB representa la corriente de excitación necesaria para hacer circular la corriente nominal con voltaje en bornes cero; pero también es igual a la abscisa del punto correspondiente a la corriente nominal sobre la recta de cortocircuito. Por lo tanto, teniendo la característica de cortocircuito, queda determinado el punto inicial de la curva de factor de potencia cero. La curva de factor de potencia cero es paralela a la de saturación en vacío. Para trazarla basta conocer dos puntos de ella.

El ensayo para determinar esta curva debe realizarse a velocidad nominal. No es indispensable que el factor de potencia sea exactamente igual a cero, los resultados que se obtienen con valores 0,1 ó 0,2 son prácticamente satisfactorios.



Características de saturación en vacío, factor de potencia cero y cortocircuito.

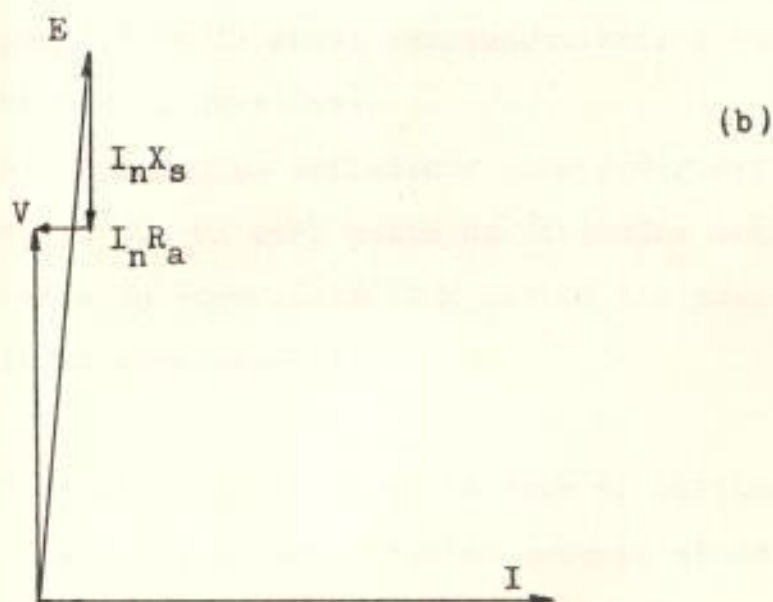


Diagrama vectorial correspondiente a las condiciones de carga bajo las cuales se obtiene la curva de factor de potencia cero.

FIGURA (7)

Puede conseguirse que el generador opere con corriente nominal y factor de potencia prácticamente cero de dos maneras.

- 1.- Conectando el generador en paralelo con la red
- 2.- Usando motores sincrónicos con baja excitación y en vacío como carga.

1.- En este procedimiento, la parte que implica conectar el generador en paralelo con la red, la dejamos pendiente hasta llegar al punto donde se explica como hacer esta operación. Realizado el proceso de la sincronización, se regula la máquina motriz de modo que el generador no entregue ni reciba potencia activa de la red. El generador se sobreexcita hasta que circule la corriente nominal por la armadura.

Con este procedimiento solo puede determinarse el punto P de la curva correspondiente a voltajes de barras (figura 7-a).

Sin embargo es suficiente para poder dibujar la curva ya que el otro punto se determina mediante la recta de cortocircuito y bastan dos puntos para trazarla completamente.

2.- Este segundo procedimiento se realiza con el uso directo de uno ó varios motores sincrónicos con la suficiente capacidad para consumir la corriente de salida del generador.

El factor de potencia de los motores sincrónicos nunca será cero debido a las pérdidas por fricción, hierro, cobre, etc. Estas pérdidas son asimiladas

por el generador siendo éste el motivo por el cual su factor de potencia verdadero esté entre 0,1 y 0,2, aproximadamente.

En este procedimiento, en caso de existir un generador y un motor, el generador debe estar sobreexcitado y el motor debe desexcitarse gradualmente hasta que la corriente alcance el valor nominal. Este método permite obtener varios puntos de la curva.

P R U E B A N º 2

P A R A M E T R O S
(Continuación)

Con esta prueba se trata de hacer conocer prácticamente los parámetros de las máquinas sincrónicas en estado de operación bajo servicio no estacionario; incluye, además, la elaboración de diagramas y esquemas de operación para la realización de las experiencias.

FUNDAMENTOS

- a) Servicio no estacionario: Proceso de Cortocircuito.- Reactancia Sincrónica Transiente y Subtransiente.- Reactancia de Secuencia Negativa y Cero.

Proceso de Cortocircuito

Los cortocircuitos se producen con alguna frecuencia en las redes que están conectadas con máquinas sincrónicas e inclusive en éstas mismas, por lo que se hace importante el análisis práctico de estas condiciones.

Consideremos en este estudio los dos casos.

Cortocircuito en la red.- Si el cortocircuito ocurre en la red, es suficiente sumar la reactancia de las líneas de transmisión desde el punto de la falla, y de la secuencia de fase correspondiente, con las reactancias X_a y X_{fa} del generador para aplicar el método de las componentes simétricas en el análisis de éstas condiciones anormales de funcionamiento y resolver de esta forma los casos diversos de cortocircuitos que se presentan en la red.

Cortocircuito en los bornes del generador.- Un cortocircuito repentino en los devanados del estator, durante los primeros ciclos del fenómeno, se convierte en un proceso más complejo que para el caso anterior, tanto si nos referimos a la propia máquina como a los aparatos de control, transformadores y líneas de transmisión y distribución que estuvieren en conexión con la máquina, ya que una sobrecorriente de este tipo puede crecer del valor de la corriente nominal en 10 ó 20 veces.

Supongamos, para analizar el caso, un generador trifásico que gira a velocidad nominal, que se excita de forma que su tensión a circuito abierto sea la E de régimen y que en estas condiciones ponemos sus bornes en cortocircuito repentinamente.

En primera instancia la corriente del inducido está limitada sólo por la reactancia de dispersión del inducido, ya que;

$$X_a \gg R_a$$

de donde

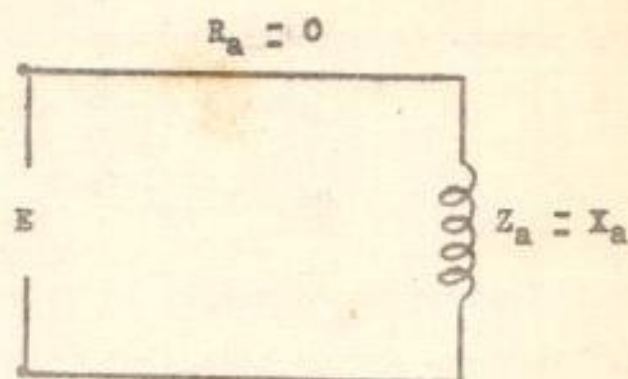
$$Z_a \approx X_a .$$

Podemos concluir fácilmente diciendo que la corriente de cortocircuito (I_{cc}) por fase está dada por la expresión:

$$I_{cc} = \frac{E}{Z_a} \approx \frac{E}{X_a}$$

Pero, revisando el caso, nos encontramos con que tenemos aplicada una tensión alterna de frecuencia nominal a un circuito inductivo en donde, si recog

casos, la corriente inicial depende del valor instantáneo de la tensión, esto es, del momento en que se cierra el interruptor para producir el cortocircuito.



La corriente en un circuito inductivo, como el que se representa en la figura arriba, está dada por la expresión:

$$i = \frac{1}{L} \int e^{-d(\tau)} d\tau$$

$$e = E_m \sin(\omega t)$$

De donde se desprende que la corriente de cortocircuito inicial por fase en la máquina (I_{cc}) puede alcanzar valores comprendidos entre E/X_a y $2E/X_a$. De tal manera que podemos escribir:

$$E/X_a \leq I_{cc} \leq 2E/X_a$$

De lo anterior deducimos que un cortocircuito simétrico aplicado simultáneamente a las tres fases del generador no altera la naturaleza equilibrada de las corrientes del inducido, puesto que en cualquier momento del proceso su suma es igual a cero.

de alcanzar valores muy grandes que de perdurar destruirían la máquina. Pero éstas corrientes, una vez que han alcanzado su valor máximo, empiezan a decrecer gradualmente respecto al tiempo hasta que se estabilizan en un valor,

$$I_{cc} = E/X_a$$

que es el valor de la corriente para el cortocircuito simétrico sostenido en una máquina sincrónica en cada fase.

El efecto de las corrientes de cortocircuito en los primerísimos ciclos del proceso lo vamos a ver en la parte siguiente.

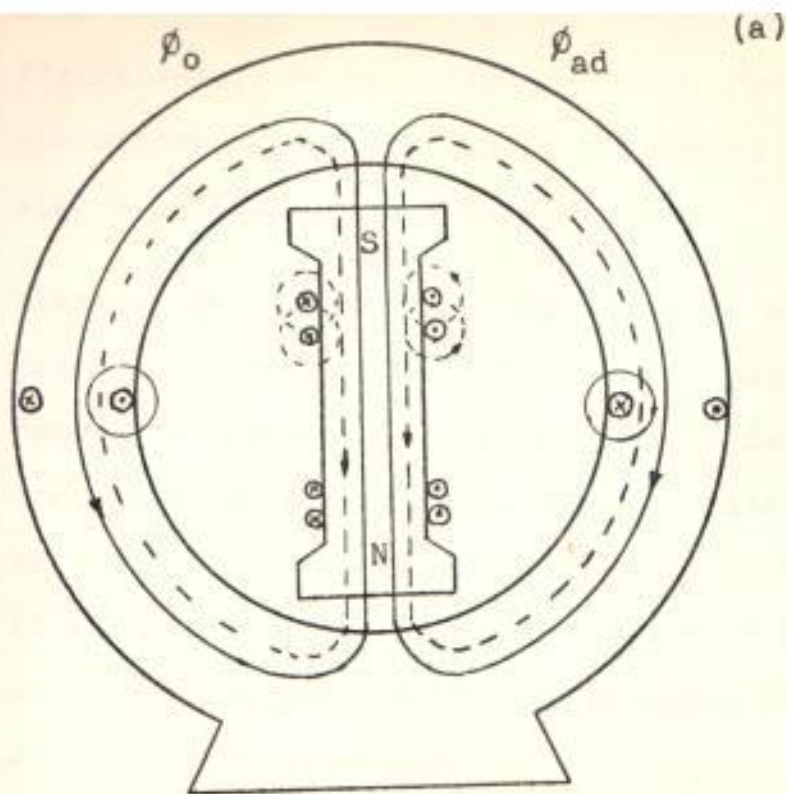
Reactancia Transiente y Subtransiente

En estado normal de operación el flujo se cierra a través del hierro del rotor de la máquina.

El flujo magnético pasa también a través de un entrehierro relativamente pequeño. Figura (8-a).

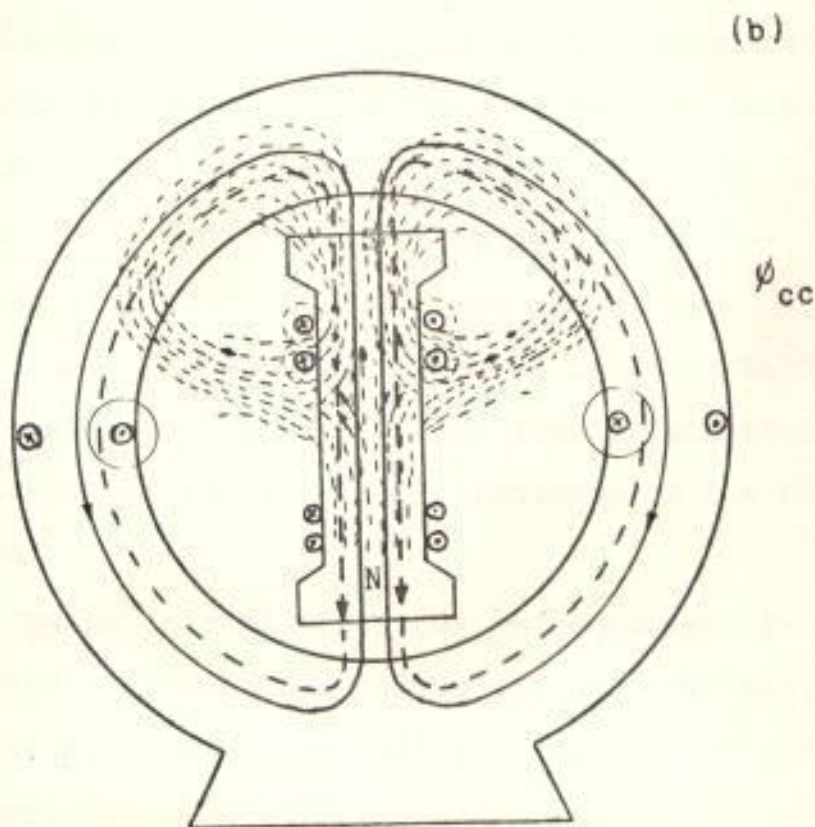
La reactancia de la máquina es inversamente proporcional a la longitud del entrehierro ($X_d > X_q$)

En el instante de producirse el cortocircuito en los bornes de la máquina, corrientes muy altas tienen lugar en el estator dando origen, asimismo, a la formación brusca de un flujo magnético adicional, que induce una reacción en el rotor en el que se forma una corriente de compensación. Esta corriente crea a su vez un flujo de sentido inverso



Camino de los flujos en operación normal de la máquina sincrónica.

FIGURA (8)



Camino distorsionado de los flujos en el instante transiente de un cortocircuito.

... la causa que lo produjo, por lo que (ρ_{cc}), en la figura (8-b), se ve obligado a salir por el camino que ofrece menor reluctancia cerrándose sobre el aire e inclusive por zonas aislantes.

Mientras la corriente del inducido cae desde su gran valor inicial, la corriente instantánea del rotor que compensa su efecto desmagnetizante, decrece también gradualmente hasta su valor primitivo.

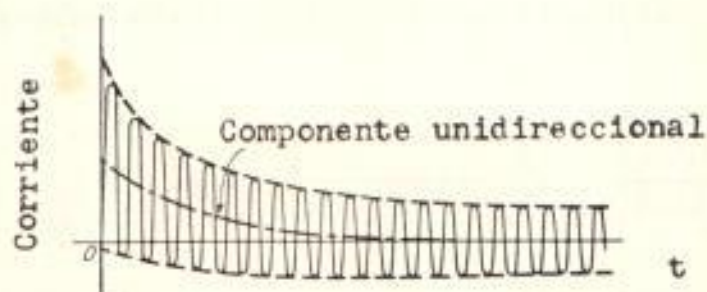
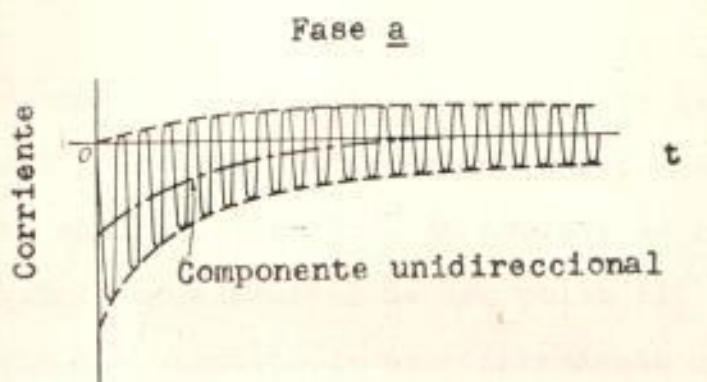
El valor inicial de la corriente instantánea de excitación es igual a la corriente del inducido en cortocircuito sostenido

En la figura (9), se puede apreciar el gradual decrecimiento de las corrientes de cortocircuito del inducido y de excitación, respectivamente, que se produce como consecuencia de la disipación logarítmica del flujo a través de la resistencia del inducido, en los arrollamientos de excitación del rotor, en las bobinas de amortiguación y en los caminos de las corrientes parásitas.

También podemos observar que la magnitud de las envolventes en las tres fases es igual, y que la componente unidireccional ó de corriente continua generalmente tiene valores distintos en las tres fases.

El valor inicial máximo de la componente de corriente continua puede, en un instante dado, ser igual al valor de la envolvente de la componente de corriente alterna.

La corriente de excitación, al igual que las co-



Fase b



Corriente de cortocircuito en las tres fases
de una máquina síncrona.

FIGURA (9)

corriente alterna y una componente de corriente continua. Decece con las mismas constantes de tiempo que las corrientes del inducido.

El circuito equivalente aproximado de la máquina puesta en cortocircuito repentinamente se lo representa en la figura (10). Se incluye la reactancia del circuito eléctrico de los polos (X_f) y la reactancia del circuito de amortiguamiento y corrientes parásitas (X_A).

La reactancia equivalente del circuito de la figura (10-a) es

$$X_d'' = \frac{1}{(1/X_{ad}) + (1/X_f) + (1/X_A)}$$

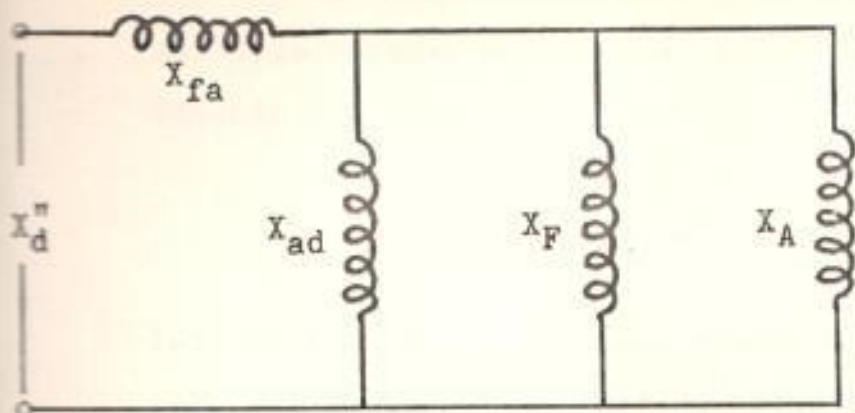
X_d'' .- reactancia subtransiente del eje directo.

Después de los primeros ciclos, el circuito equivalente toma la forma que aparece en la figura (10-b), debido a que el efecto del devanado amortiguador y de las corrientes parásitas en las caras polares desaparece, a causa de que las resistencias asociadas a estos circuitos secundarios son relativamente mucho mayores que la resistencia del arrollamiento de excitación. La reactancia equivalente de este circuito es

$$X_d' = \frac{1}{(1/X_{ad}) + (1/X_f)}$$

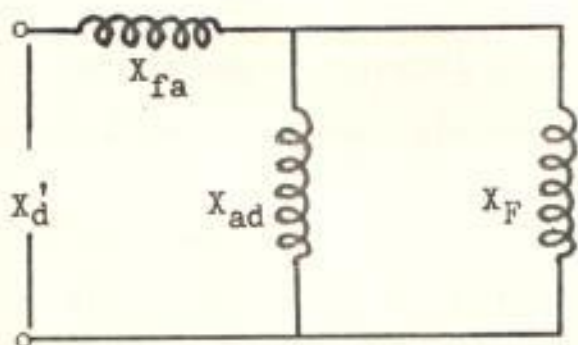
X_d' .- reactancia transiente de eje directo.

(a)



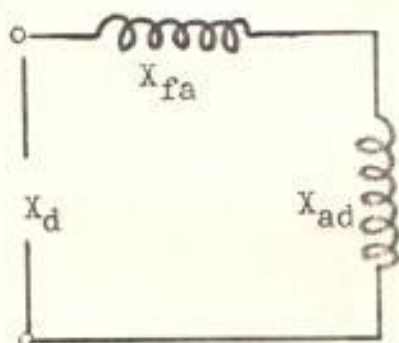
Circuito equivalente aproximado; reactancia subtransiente de eje directo.

(b)



Circuito equivalente aproximado; reactancia transiente de eje directo.

(c)



Circuito equivalente aproximado; cortocircuito de régimen permanente.

FIGURA (10)

Finalmente, el circuito equivalente que nos muestra la figura (10-c) es la reactancia de cortocircuito de régimen permanente, que resulta de la extinción del efecto del arrollamiento de excitación

$$X_d = X_{fa} + X_{ad}$$

Las reactancias transientes y subtransientes se determinan en base a un cortocircuito trifásico brusco en la máquina e inscribiendo oscilogramas de las corrientes de cada fase del estator (una fase es suficiente).

Los oscilogramas en general presentan una componente unidireccional sumada a la componente sinusoidal de amplitud decreciente. Figura (9).

Si trasladamos la componente continua de tal manera que dejamos la onda restante simétrica respecto al eje de abscisas como en la figura (11), podemos decir que la ordenada inicial de la envolvente es igual a

$$E_m/X_d''$$

siendo E_m el valor máximo del voltaje en cada fase antes de aplicar el cortocircuito.

Midiendo entonces E_m y dicha ordenada inicial, OB en la figura se determina X_d'' .

$$X_d'' = E_m/OB$$

Extrapolando la envolvente de la corriente en el período transiente la ordenada inicial OA es igual a

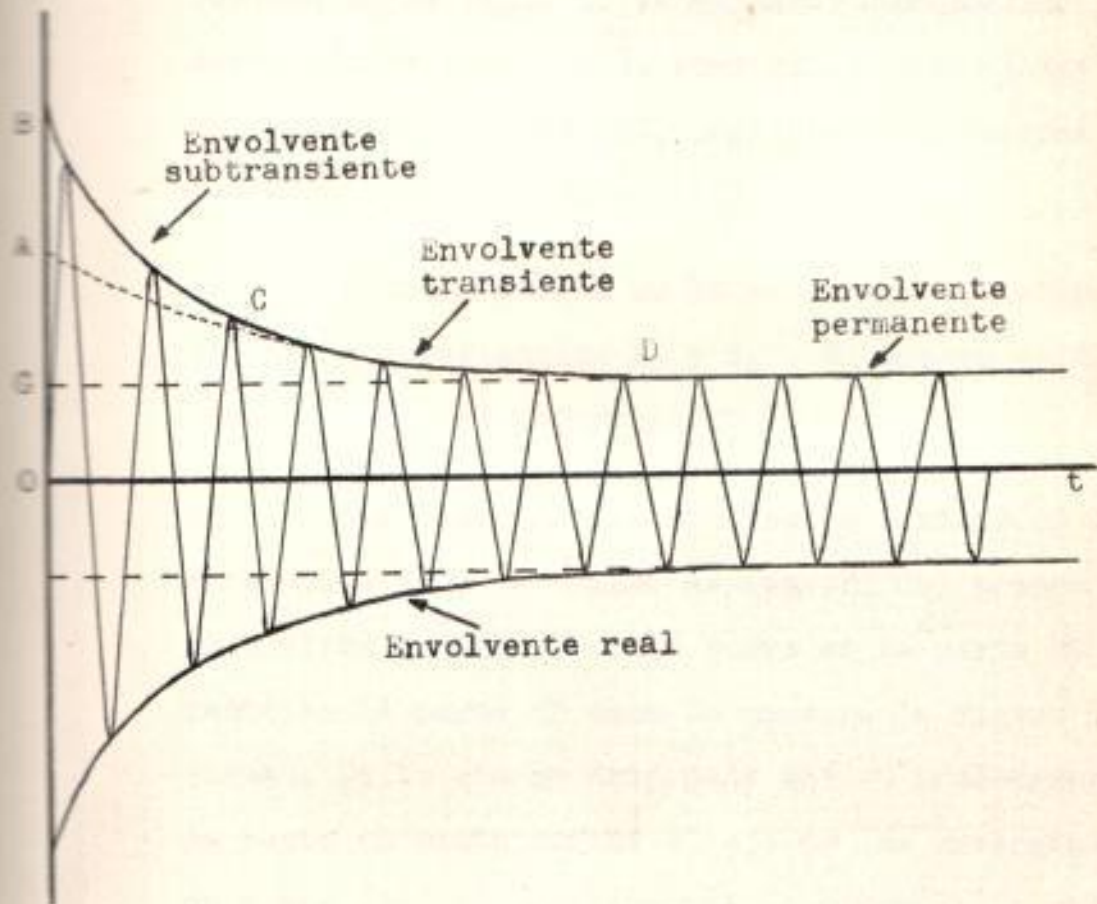


FIGURA (11)

$$E_m / I_d$$

de donde

$$I_d' = E_m / OA.$$

La razón de las relaciones anteriores se explica de la siguiente manera.

La caída de la componente de corriente alterna de la corriente de cortocircuito, es logarítmica, el régimen de la caída no es el mismo durante los primeros ciclos (trazo BC), como sucede con el intervalo restante (trazo CD), como puede apreciarse claramente en la figura (11).

Esto se produce porque en BC se siente la influencia de las reactancias X_f y X_A . El efecto de X_A desaparece en el intervalo CD.

Si los logaritmos de las amplitudes máximas de la envolvente real se trazan en función del tiempo, el gráfico resultante será curvo en la parte BC y recto en la parte CD como lo muestra la figura (12-a). De lo que se desprende que si prolongamos la recta CD hasta cortar el eje de las ordenadas en A nos dará el logaritmo de la ordenada OA que es, por lo tanto, la amplitud de la corriente que fluiría si X_A fuese infinita, es decir, si la reactancia transitoria actuase sola, con lo que la envolvente de corriente transiente está dada por la curva ACD.

De donde

$$I_d' = E_m / OA.$$

El cálculo de las reactancias transiente y subtransiente, según el método que hemos analizado, se desarrolla de la siguiente manera:

Una vez que se ha trasladado la componente unidireccional de tal manera que la onda restante queda simétrica respecto al eje de abscisas, figura (11) procedemos a graficar, en papel semilogarítmico, puntos que resultan de la diferencia entre los valores de la envolvente real y la envolvente de estado permanente. La unión de todos estos puntos nos determina la curva de la figura (12-a).

La envolvente de estado transiente es la recta ACD que toma esta forma por las razones explicadas anteriormente. De allí que

$$I_d' = \frac{E_m}{OA} = \frac{E_m}{I_{ccmax.}}$$

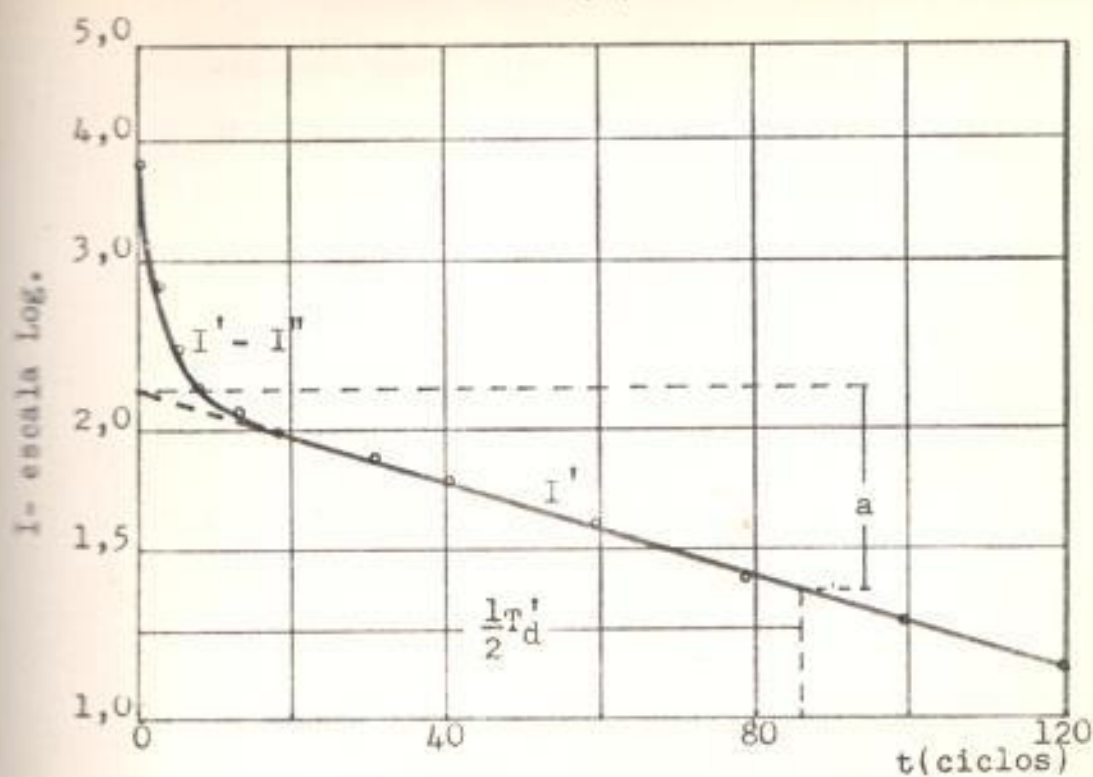
Y la curva BC nos determina la envolvente de estado subtransiente. De donde

$$I_d'' = \frac{E_m}{OB} = \frac{E_m}{I_{ccmax.}}$$

Reactancia de secuencia Negativa y Cero

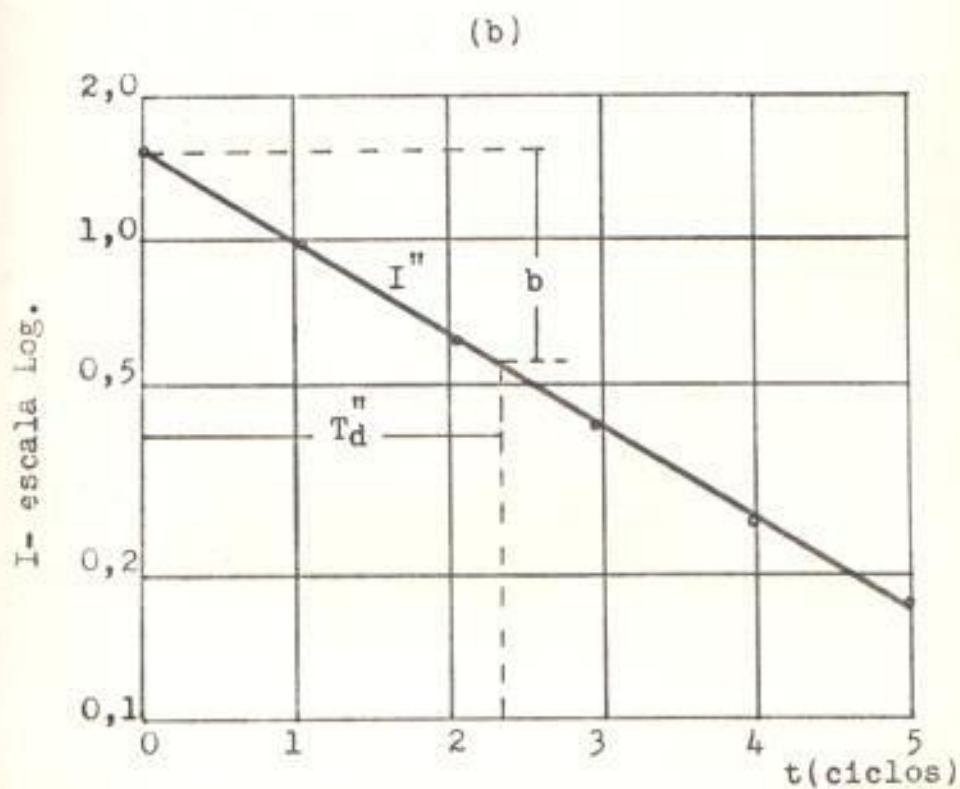
Las reactancias de secuencia negativa y cero tienen lugar en el instante en que la máquina sincrónica sufre un cortocircuito asimétrico, ya sea en los bornes mismos o en cualquier punto del sistema al cual alimenta.

Un cortocircuito repentino de un generador trifásico, en dos cualesquiera de sus bornes o entre li-



Componente transiente de I_{cc} de armadura, del cual se deduce también la constante de tiempo T_d' .

FIGURA (12).



Componente subtransiente de I_{cc} de armadura, del cual se obtiene también la constante de tiempo T_d'' .

nea y neutro, obliga a que éste funcione como una máquina monofásica, transformando notablemente las condiciones equilibradas, estudiadas anteriormente

La condición de operación monofásica, crea una corriente monofásica, que produce a su vez, una fmm de frecuencia nominal, pero que permanece fija en el espacio. Esta fmm puede dividirse en dos componentes (según la teoría enunciada por Fresnel) que giran en sentidos opuestos, cada una tiene una magnitud invariable igual a la mitad del valor máximo de la fmm alterna primitiva y giran con la frecuencia de ésta última.

La componente que gira con el rotor reacciona con su arrollamiento de la misma forma que en el caso de un circuito simétrico, de donde que la forma de la corriente de cortocircuito del inducido sea del tipo de una de las corrientes de fase que se ilustra en la figura (9), y la corriente de excitación tiene una corriente unidireccional instantánea igual en su forma a la curva ab de la misma figura.

La componente que gira en sentido inverso induce en el arrollamiento de excitación del rotor una fem y una corriente de doble frecuencia, pero con amplitudes que decrecen exponencialmente hasta alcanzar las condiciones de régimen permanente de un generador monofásico.

La solución analítica de problemas que comprenden cortocircuitos asimétricos se realiza resolviendo la corriente desequilibrada por el método de las

componentes simétricas, esto es, en un conjunto de corrientes de secuencias positiva, negativa y cero.

Las corrientes de secuencia positiva constituyen un conjunto equilibrado de corrientes trifásicas que produce una fmm que viaja a velocidad sincrónica con el rotor.

Las componentes de secuencia negativa producen una fmm del inducido que gira en sentido contrario al campo del rotor por lo que establece fems y corrientes de frecuencia doble en el arrollamiento de excitación, en el devanado amortiguador y en los caminos de las corrientes parásitas.

En las máquinas de rotor cilíndrico $X_1 = X_2$, pero en las de polos salientes estas dos reactancias son diferentes.

Las componentes de secuencia cero de la corriente del inducido producen cada una fms iguales separadas espacialmente 120° por lo que su resultante es cero.

Se determina la reactancia de secuencia negativa experimentalmente aplicando una tensión equilibrada de secuencia negativa a las bornas del inducido. Su velocidad es la de régimen (impulsada). El arrollamiento de excitación debe estar en cortocircuito para hacer la medición.

Entonces

$$Z_2 = E/\sqrt{3}I$$

Si disponemos de un vatímetro su lectura nos dará

las pérdidas I^2R con lo que obtenemos la resistencia por fase (R).

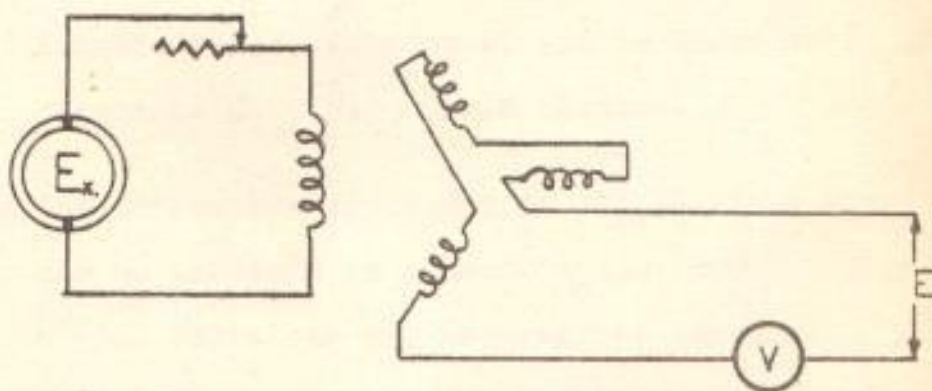
De donde

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad \text{Ohm/fase.}$$

Hay que tener presente el recalentamiento del rotor que se torna peligroso cuando se prolonga por mucho tiempo la prueba y cuando no se reduce la corriente

La reactancia de secuencia cero se mide experimentalmente cortocircuitando el arrollamiento de excitación e impulsando el rotor a velocidad de régimen

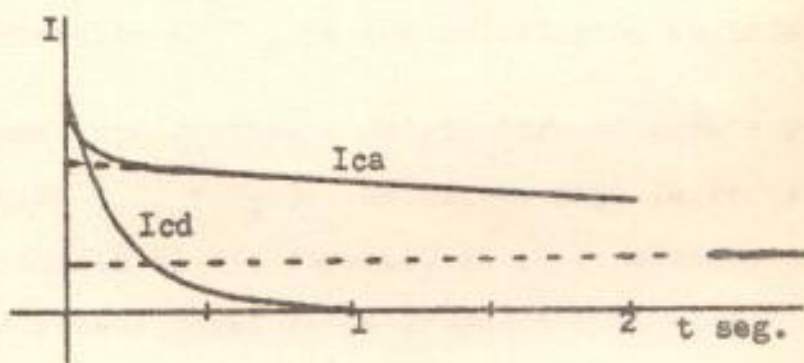
Las fases del inducido se conectan en serie para hacer circular una corriente monofásica al aplicar una tensión a las bornas abiertas.



De donde

$$X_0 = E/3I$$

En las máquinas eléctricas las corrientes de cortocircuito, en general, están definidas por curvas que decrecen gradualmente en forma exponencial. Si consideramos el sistema eléctrico de la máquina como un circuito lineal exento de capacitancia, la corriente transiente tendrá componentes que decrecen exponencialmente con el tiempo, en la forma que se ilustra en la figura abajo.



Componentes de la corriente de armadura en cortocircuito.

El tiempo que toma la corriente en recobrar su valor simétrico respecto al eje de abscisas es la constante de tiempo de la máquina.

Las constantes de tiempo de las máquinas sincrónicas se analizan de acuerdo a las corrientes que limitan. Entre las más importantes tenemos:

Constante de tiempo de eje directo para circuito abierto (T'_{do} y T''_{do}).- Es la que rige la variación de la corriente de campo cuando se abre repentinamente el circuito de armadura.

$$T'_{do} = L_{ff}/R_f \text{ seg.}$$

L_{ff} .- autoinductancia del circuito de campo medida en henrys.

R_f .- resistencia del circuito de campo medida en ohms.

Las constantes T'_{do} y T''_{do} pertenecen a los estados transiente y subtransiente, respectivamente. El promedio de duración es de 6 segundos para la primera y de 0,125 segundos para la segunda. (x)

En caso de existir un reóstato en el circuito de excitación debe incluirse su resistencia para la obtención de T'_{do} ya que su relación es inversa.

Constante de tiempo de eje directo para cortocircuito (T'_d y T''_d).- Es la que rige la variación, respecto al eje directo, de la componente de corriente alterna de la armadura y la componente de corriente directa del campo. Se llama también constante de tiempo de campo.

T'_d es la constante de estado transiente y se obtiene a partir de la relación entre las reactancias de circuito abierto y de cortocircuito, esto es,

$$T'_{do}/T'_d = X_d/X'_d$$

$$X_d/X'_d \approx 1/4$$

De donde su valor promedio es 1,5 segundos.

T''_d es la constante de estado subtransiente y su tiempo promedio es 0,035 segundos (2 ciclos). (x)

(x).- Edward W. Kimbark.

POWER SYSTEM STABILITY: Synchronous Machines

Constante de tiempo de eje en cuadratura para cortocircuito (T'_q y T''_q).- Es la que rige la variación de la componente de corriente alterna de la armadura y la componente de corriente directa del campo respecto al eje en cuadratura.

T'_q pertenece al estado transiente y alcanza valores alrededor de 0,8 segundos. (x)

T''_q está ligada al estado subtransiente y su tiempo de duración es alrededor de 0,035 segundos.

Constante de tiempo de armadura (T_a).- Rige la variación de las componentes de corriente directa de armadura y de corriente alterna del campo.

$$T_a = L_2/R_a = X_2/\omega R_a$$

X_2 .- reactancia de secuencia negativa

R_a .- resistencia de la armadura (corriente directa)

T_a alcanza valores alrededor de 0,15 segundos cuando se cortocircuitan los terminales de la armadura sin la presencia de resistencia externa en su circuito. De lo contrario su valor se reduce notablemente.

El cálculo de las reactancias y de las constantes de tiempo de estado transiente y subtransiente se realizan, a partir de un oscilograma, de la siguiente manera.

1.- Obtención de la componente unidireccional.

Se promedian los valores pico de la envolvente general . $(a + b)/2$, $(b - c)/2$, etc.

2.- Traslación de la componente unidireccional hasta confundirse con el eje de abscisas.

Con este paso lo que se consigue es dejar a todas las envolventes simétricas respecto a los ejes de coordenadas.

3.- Obtención de la envolvente transiente.

Se restan los valores pico de la envolvente de corriente sostenida de la envolvente de componente de corriente alterna y se grafica la diferencia en papel semilogarítmico. Ver figura (12-a). La prolongación de DC nos determina el punto A que es el valor inicial de la componente transiente ($I'_{max.}$).

4.- Obtención de la envolvente subtransiente.

Si en la figura (12-a), a la parte BC que corresponde a los primeros ciclos del proceso, le restamos la prolongación de I' el resultado, asimismo graficado sobre papel semilogarítmico, es una recta, cuya intersección con el eje de ordenadas nos determina el valor inicial de la componente subtransiente ($I''_{max.}$).

5.- Obtención de X_d , X'_d , X''_d , T'_d y T''_d .

$$X_d = E/I_{cc}$$

$$X'_d = E/I_{cc} + I'_{max}$$

$$I_d = E / I_{cc} + I_{max} + I_{max}$$

Para calcular las constantes T_d' y T_d'' es necesario conocer las constantes a y b, respectivamente.

$$a = 1/\sqrt{e} \cdot I_{max}'$$

De donde $1/2 \cdot T_d'$ es el tiempo requerido para que I' descienda a $1/e$ (0,606) veces su valor inicial.

$$b = 1/e \cdot I_{max}''$$

T_d'' es el tiempo tomado por I'' para decrecer a $1/e$ (0,368) de su valor inicial.

Los elementos de corriente y tensión son tomados en su valor eficaz y por fase.

PRUEBA N° 3

LA CONEXION DE LOS ALTER-
NADORES SINCRONICOS A LA
RED

Con esta prueba se tratan los métodos más conocidos de sincronización de una máquina a un sistema. Se estudiará también el comportamiento de la máquina sincrónica cuando es conectada a la red en condiciones ligeramente incorrectas de sincronización. Y finalmente se considerará la repartición de carga de los alternadores.

FUNDAMENTOS

a) Generalidades

La razón de emplear varios generadores, que funcionan en paralelo, está dada principalmente por la variación considerable de la carga durante el día y diferentes épocas del año.

También porque las centrales modernas tienen una potencia de salida bastante grande como para poder producirla con una sola máquina.

Además este sistema nos permite aumentar la confiabilidad del suministro, principalmente a los centros industriales, ya que se forma una red común alimentada por varias centrales que entre otras cosas ofrece las siguientes ventajas:

La capacidad instalada puede ser disminuida en cada central en casos de reparación y paros de emergencia.

La carga puede ser distribuida con más rendimiento a fin de que todo el sistema (red) sea más económi-

La potencia hidráulica tiene su máximo de utilización cuando funcionan en paralelo las centrales hidroeléctricas y térmicas.

- b) Puesta en paralelo de los alternadores: Método de las Lámparas de Sincronización.- Método del Sincronoscopio.- Método de la Autosincronización.

Para poner en paralelo un generador con otros ya en funcionamiento es necesario que:

- 1.- Su velocidad corresponda exactamente con la frecuencia del sistema.
- 2.- Su tensión sea numéricamente igual a la del sistema en las bornas en las que se efectúe la conexión.
- 3.- Su tensión esté en fase con la de la barra colectora en el punto de conexión (secuencias de fases de la máquina y la barra iguales).

Las consideraciones hechas anteriormente demuestran la necesidad de un dispositivo que nos indique el instante de conectar la máquina a las barras colectoras principales. Entre los métodos de sincronización tenemos los siguientes:

Lámparas de Sincronización

Este método exige el uso de lámparas incandescentes conectadas en la forma como lo demuestra la figura (13).

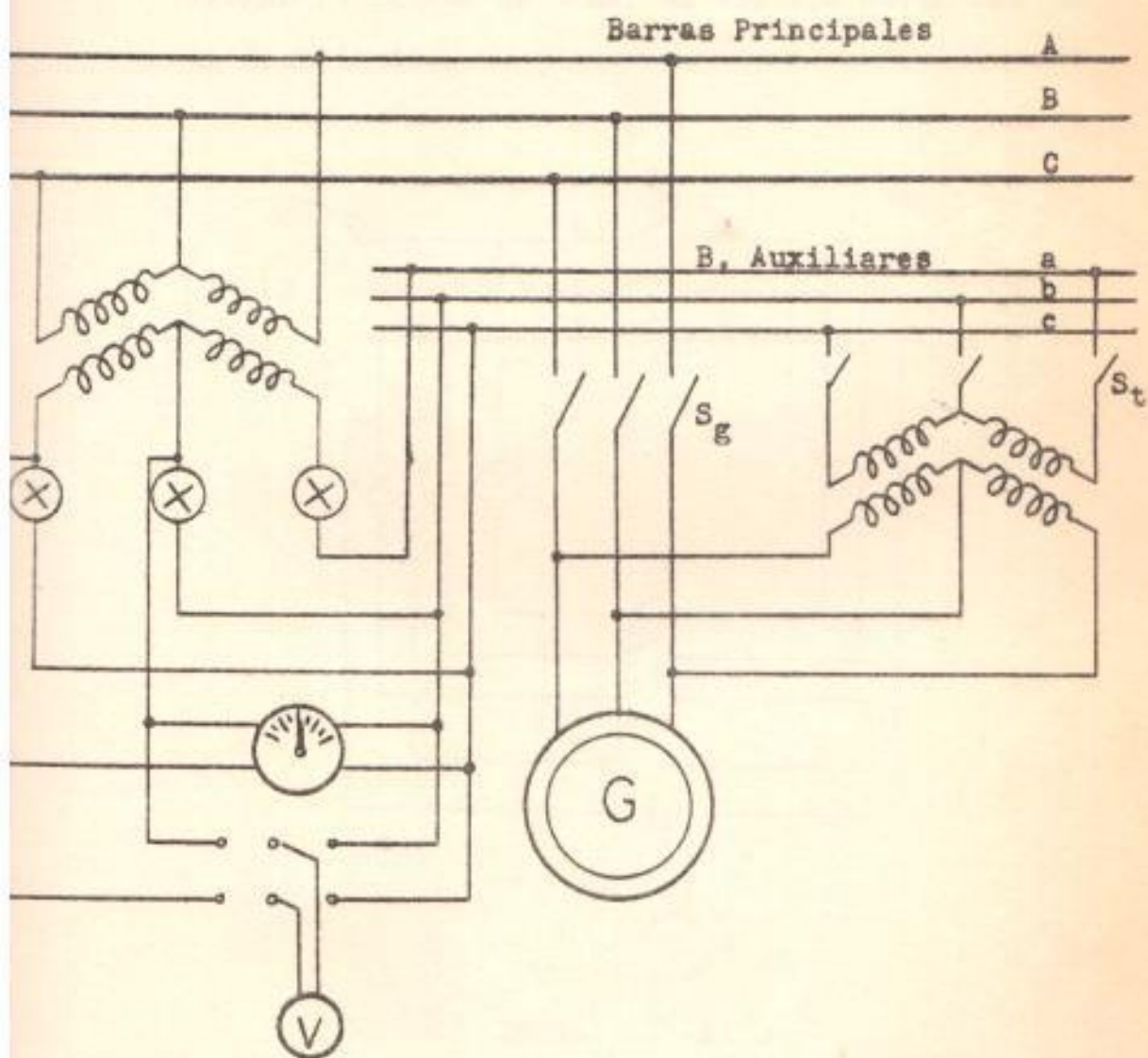
El cuadro de mando del alternador está provisto de un par de transformadores de tensión (cuando la tensión de la barra principal es diferente de la de generación) conectados en delta abierta cuyos secundarios se conectan a una barra auxiliar mediante interruptores.

Cuando el generador G ha alcanzado aproximadamente la velocidad de sincronismo se conecta a la barra auxiliar a través del transformador, o sea utilizando el interruptor S_t .

Las lámparas fluctuarán con una frecuencia igual a la diferencia entre las frecuencias de la red (f_r) y del generador (f_g).

La magnitud de la tensión de G puede ajustarse de forma que sea igual a la de la barra principal con la ayuda de un voltímetro (V) que se conecta alternativamente a la red y a la barra auxiliar o de sincronización. Aún después de tener las tensiones y las frecuencias iguales, las lámparas pueden permanecer regularmente encendidas debido a una diferencia de fase entre las tensiones del generador y la red. Un nuevo ajuste de la velocidad de G nos conducirá a poner las dos tensiones en fase.

Las lámparas están conectadas de tal manera que las dos tensiones se oponen a través de ellas por lo que en última instancia deben estar apagadas. En este instante puede cerrarse el interruptor S_g y abrirse S_t con lo que el proceso de sincronización concluye.



Esquema de conexiones para la sincronización de un alternador a un sistema.

FIGURA (13)

Cuando se conecta un generador en paralelo con otro o a una red de baja tensión, se pueden suprimir los transformadores de tensión. Figura (13-1).

Las lámparas deben ser de tal característica que tengan capacidad de tomar un voltaje doble del de la instalación.

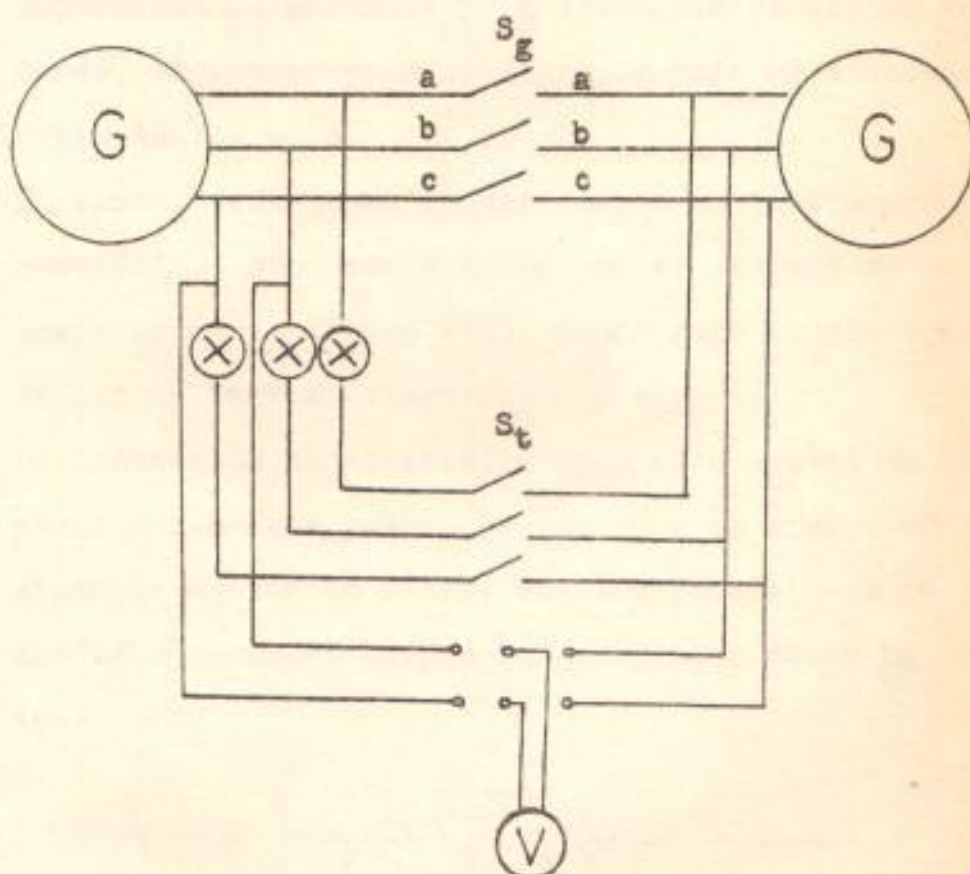


FIGURA (13-1)

Sincronoscopio

En instalaciones grandes se utilizan los indicadores de sincronismo o sincronoscopios.

Este instrumento tiene una aguja que puede rotar en uno u otro sentido según que la velocidad del generador síncrono (alternador) que se va a poner en paralelo con la red u otro generador de referencia,

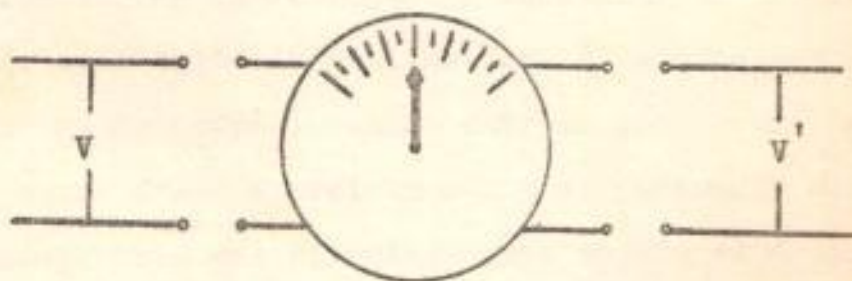
sea mayor o menor que la debida.

La aguja se detiene cuando las frecuencias son iguales y se detiene en cero cuando la máquina está en fase con el sistema o la otra máquina de referencia, es decir, los voltajes de las fases respectivas de la máquina y del sistema de referencia están en fase.

Comprobada la magnitud y la secuencia de dichos voltajes, el interruptor se cierra cuando el sincronoscopio indica cero.

El sincronoscopio es esencialmente un instrumento monofásico, como puede verse por el esquema de conexiones de la figura (13), donde está asociado con un par de barras colectoras b y c.

La indicación de sincronismo por este método es completa únicamente cuando se sabe por un ensayo preliminar de ajuste de fases, que los potenciales de los tres pares de bornes son simultaneamente iguales.



Autosincronización

Recientemente, para evitar el uso de esquemas complicados de sincronización automática y aumentar la velocidad y la confiabilidad de la sincronización,

de la adaptación al uso del método de la autoexcitación, durante el cual el generador, no excitado, cuando alcanza una velocidad casi igual a la de sincronismo se conecta al circuito de potencia con una resistencia activa adicional añadida a su circuito de excitación, y luego es excitado.

El generador excitado entra en sincronismo de modo a nálogo al de un motor sincrónico después del arranque que asincrónico.

Se cierra preliminarmente el devanado de excitación a través de la resistencia adicional para debilitar la sobrecorriente del estator, ya que el flujo de reacción del inducido, al variar desde cero a un cierto valor durante la conexión, induce una corriente en el circuito de excitación cerrado, debido a lo cual el proceso es análogo al de conexión de un transformador con la línea teniendo el secundario en cortocircuito.

La función de la resistencia adicional en el circuito de excitación la realiza también el Resistor de Descarga de Campo (cuando ocurren los cortocircuitos entre fases sucesivamente y el generador tiene que separarse del circuito) cuyo objeto es descargar rápida y simultáneamente el campo de excitación para limitar la duración del efecto perjudicial de las corrientes de cortocircuito en el devanado del estator. La interrupción a velocidades muy altas de la corriente de excitación es inadmisibles porque la extinción rápida del flujo de excitación induciría una gran fem peligrosa para la máquina. Esta es la

razón por la que el devanado de excitación se pone en paralelo primero con una resistencia de 5 a 10 veces el valor de la resistencia de su devanado, y luego se desconecta el excitador.

No es posible conectar directamente a la red de potencia un generador para aplicar la autosincronización, estando abierto el circuito de excitación, porque podría destruirse el aislamiento de éste último debido a la gran fem que se induce en su devanado.

d) División de la carga entre alternadores en paralelo.

Un alternador operando en paralelo con un gran sistema en el cual el voltaje V y la frecuencia f se mantienen constantes, puede ser representado por el diagrama de vectores de la figura (15-a), donde I_a es la corriente de armadura por fase, E_o es el voltaje debido a la excitación y se ha despreciado la caída en la resistencia de la armadura.

La potencia de salida por fase en los alternadores

con factor calibrado, donde la resistencia de armadura es pequeña comparada con la reactancia, puede ser expresada

$$P = \frac{VE_0}{I_s} \text{sen } \delta \quad (1)$$

Para alternadores de polos salientes la potencia es

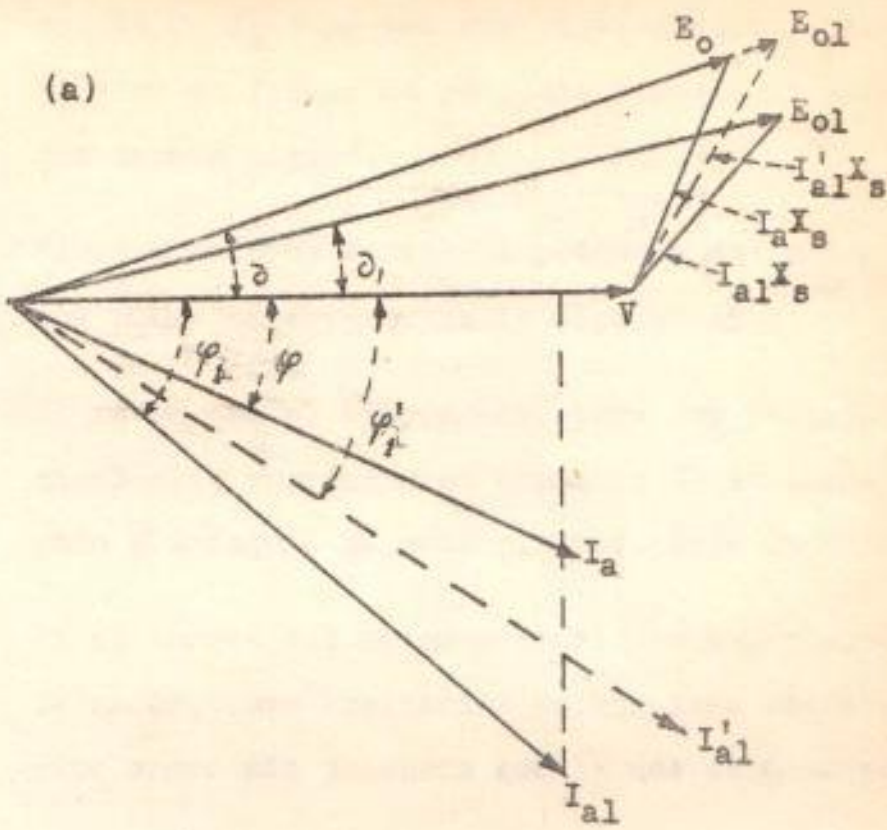
$$P = \frac{VE_d}{I_d} \text{sen } \delta = \frac{V^2(X_d - X_q)}{2X_d X_q} \text{sen } 2\delta \quad (2)$$

Un incremento en la excitación causa un incremento en el voltaje de excitación E_0 a E_{01} . (Figura 15-a) En la ecuación (1) el incremento en E_0 causa un incremento en la potencia de salida, haciendo que temporalmente el alternador desarrolle más potencia que la que recibe de la máquina que lo impulsa. La corriente se ha incrementado a I'_{a1} y la potencia a $VI'_{a1} \cos \phi'_1$.

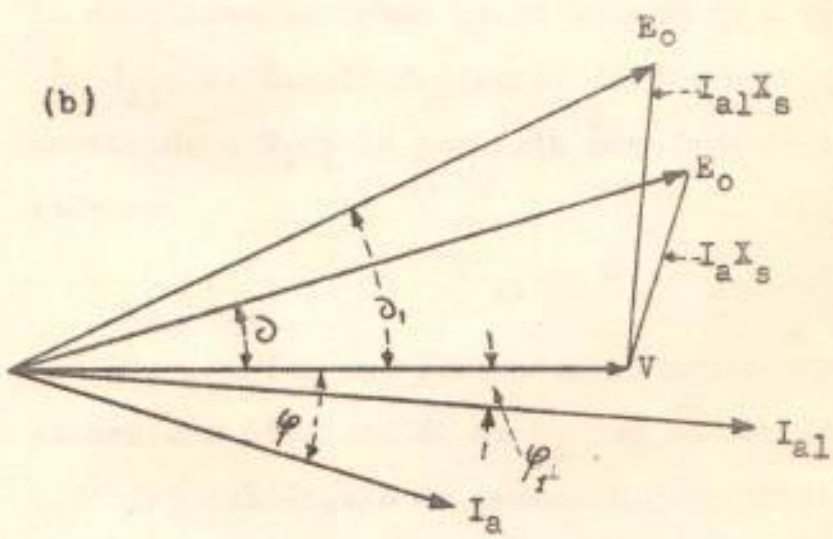
Puesto que ningún cambio se ha hecho en el motor impulsor, el alternador no puede continuar desarrollando esta potencia y por consiguiente cae su velocidad momentáneamente hasta que el ángulo de potencia δ decrezca a un valor δ_1 de manera que la potencia adquiera su valor inicial.

Bajo estas condiciones la corriente se ha incrementado a I_{a1} y el factor de potencia disminuido a ϕ_1 de tal manera que la potencia de salida y el voltaje terminal permanecen invariables.

El nuevo factor de potencia es $\cos \phi_1$.



Variación de la excitación de un alternador en paralelo con la red. Potencia de entrada constante.



Variación de la potencia de entrada de un alternador conectado a la red.

Una reducción de la excitación producirá una disminución de E_0 y un aumento en el ángulo de potencia δ y en el factor de potencia sin que la carga sufra cambio alguno.

El resultado de variar la potencia del motor impulsor puede observarse en la figura (15-b).

Se asume que el alternador opera con voltaje en terminales V , corriente de armadura I_a atrasada un ángulo φ , ángulo de potencia y voltaje inducido E_0 .

Si el torque del motor primario es aumentado, el alternador, cuya excitación se mantiene constante, recibe ahora más potencia que la que está entregando.

El desbalance en la potencia obliga que la máquina se acelere y E_0 se mueva hasta un nuevo ángulo de potencia δ_1 permitiendo suficiente aumento en $\sin \delta$ e I_a para que el equilibrio sea restablecido.

La corriente de armadura ha aumentado a un nuevo valor I_{a1} , el ángulo de factor de potencia (inductivo) decrecido a φ_1 y la potencia por fase se ha convertido en

$$P = VI_{a1} \cos \varphi_1.$$

Una disminución del torque en el motor impulsor provocará una disminución de E_0 con el consiguiente descenso del ángulo de potencia, corriente de armadura y potencia de salida del alternador.

El ángulo de factor de potencia crece.

Si las características de los motores primarios son iguales, los alternadores distribuirán la carga automáticamente en proporción a sus capacidades. Por el contrario, si las características de los motores impulsores no son las mismas, los alternadores no dividirán la carga proporcionalmente.

Los motores primarios deben tener siempre una característica inclinada de velocidad, como ilustra la figura, de tal manera que un incremento de la carga se corresponda con una momentánea baja de la velocidad.

La distribución de carga entre dos o más generadores de corriente continua en paralelo puede ser variada por medio de la excitación.

No ocurre igual con los alternadores puesto que un alternador en paralelo con otros no puede disminuir su velocidad y lo que hace es pedir más potencia del motor impulsor.

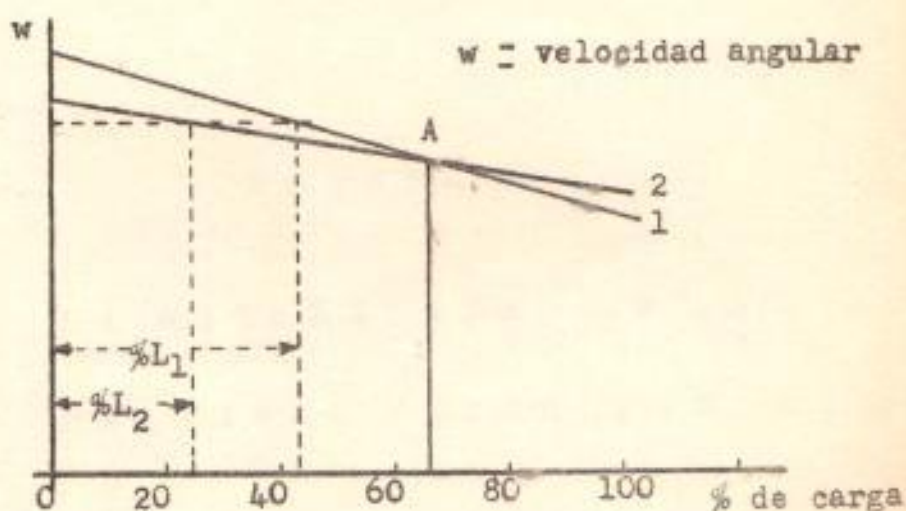
El exceso de excitación se traduce en un incremento de pérdidas de cobre en la armadura y en la formación de una corriente circulatoria en cuadratura sin afectar materialmente a la potencia proporcionada.

La distribución de carga entre alternadores en paralelo puede ser medida sólo por la lectura de los vatímetros en los circuitos de cada máquina.

Si la carga de un alternador va a ser aumentada de-

de incrementarse el torque del motor primario. Si el motor es una turbina de vapor debe aumentarse la cantidad de vapor.

Es necesario variar la excitación del campo del alternador también, pero esto es solo imposición de la variación de la caída por impedancia de armadura que nada tiene que ver con la carga que toma la máquina. La carga es controlada enteramente por el motor impulsor.



Características velocidad-carga

Si dos alternadores conectados en paralelo tienen diferentes características velocidad-carga, como se ilustra en la figura arriba por las curvas 1 y 2, se dividirán la carga proporcionalmente a sus regímenes solo a la velocidad particular en que se cortan sus características (punto A).

PRUEBA N° 4

LA ESTABILIDAD EN LAS
MAQUINAS SINCRONICAS

Esta prueba permite estudiar las características de potencia de la máquina sincrónica. El trabajo se realiza con la variación de la potencia y la observación inmediata de los diversos elementos que entran en juego en tales circunstancias.

Se consideran también dos casos especiales de potencia con los cuales se llega al límite de estabilidad estática.

La prueba consta de tres experiencias para cuyo desarrollo haremos el estudio conveniente.

FUNDAMENTOS

a) Características del ángulo de potencia

Los problemas que tienen que ver con el funcionamiento de las máquinas sincrónicas conectadas al circuito de potencia se tratan convenientemente expresando la potencia en función de cantidades que caracterizan el efecto de factores externos, tales como la tensión de línea V , la fem E_0 inducida por la corriente de excitación y el ángulo δ entre los vectores V y E_0 que determina la posición angular tomada por el rotor con respecto al flujo magnético giratorio resultante del estator.

Entonces la potencia puede expresarse también como

$$P = F(E_0, V, \delta)$$

Cuando los valores V , E_0 y f permanecen constantes

la potencia de la máquina depende específicamente del ángulo δ ; de donde

$$P = F(\delta)$$

es la expresión que se denomina Característica del Ángulo de Potencia de la máquina sincrónica.

Despreciando la resistencia activa en el devanado del estator y la de la línea de transmisión analicemos las características del ángulo de potencia.

El diagrama vectorial de tensión de un generador de polos salientes se muestra en la figura abajo. Fácilmente se observa que $R_a = 0$

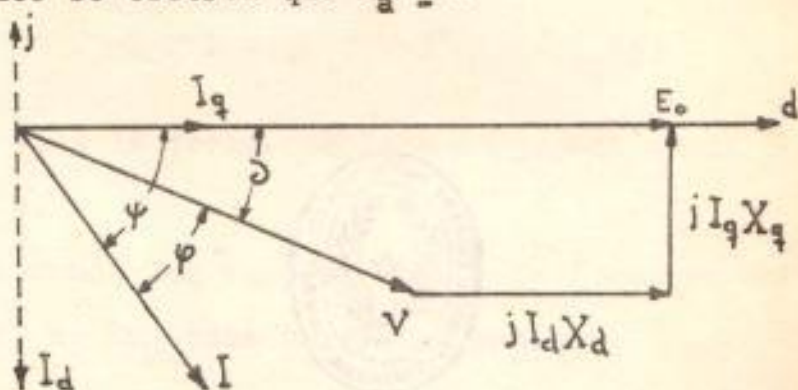


Diagrama de tensión del generador sincrónico con polos salientes.

Proyectando las tensiones y las fems sobre los ejes d y q, obtenemos

$$E_0 = V \cos \delta + I_d X_d$$

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

De donde

$$I_d = \frac{E_o - V \cos \delta}{X_d} \quad (1)$$

$$I_q = \frac{V \sin \delta}{X_q}$$

Llevando el diagrama al plano de coordenadas complejas, podemos escribir

$$\begin{aligned} \bar{V} &= V \cos \delta - jV \sin \delta \\ \bar{I} &= I_q - jI_d \end{aligned} \quad (2)$$

La ecuación compleja para la potencia por fase de un generador es

$$S = P + jQ = \bar{V} I^* \quad (3)$$

donde I^* es la forma compleja conjugada de la corriente.

Sustituyendo los valores de \bar{V} y de \bar{I} de las ecuaciones (2) en la ecuación (3) se obtiene

$$S = (V \cos \delta - jV \sin \delta) \cdot \left(\frac{V}{X_q} \sin \delta + j \frac{E_o - V \cos \delta}{X_d} \right)$$

Resolviendo y ordenando se obtiene finalmente

$$\begin{aligned} S = & \frac{VE_o \sin \delta}{X_d} + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \\ & + j \left[\frac{VE_o \cos \delta}{X_d} - V^2 \left(\frac{\cos^2 \delta}{X_d} + \frac{\sin^2 \delta}{X_q} \right) \right] \end{aligned}$$

Donde la componente real de S determina la potencia activa y la componente imaginaria la potencia reactiva de la máquina.

Analizando la potencia activa P , que es lo que nos

interesa, decimos que el primer término de su expresión

$$P_o = \frac{E_o V}{X_d} \text{sen } \delta$$

es la componente fundamental de la potencia. Depende de la tensión de línea V y de la fem E_o producida por la excitación, mientras que el segundo término

$$P_u = \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{sen } 2\delta$$

es la componente adicional de la potencia que no depende de la excitación de la máquina e introduce el efecto de los polos salientes.

P_u se denomina también Potencia de Reluctancia, debido a que la máquina es capaz de girar sincrónicamente y desarrollar un par motor, (siendo la excitación igual a cero) por motivo de que el flujo de reacción del inducido tiende a pasar a través del rotor siguiendo el camino de menor reluctancia, es decir, a lo largo del eje directo.

Para máquinas de rotor cilíndrico $X_d = X_q$, por consiguiente, $P_u = 0$ y la potencia queda expresada por

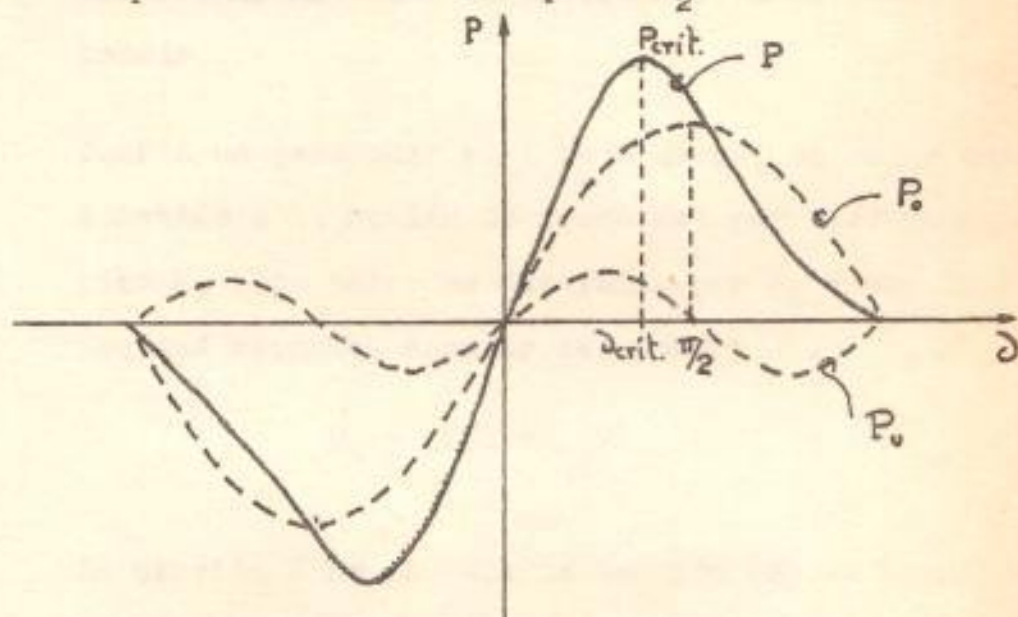
$$P = \frac{E_o V}{X_d} \text{sen } \delta$$

En la figura (16) se representa las curvas de las componentes de la potencia (P_o y P_u) y la de la potencia resultante (P) de un generador de polos salientes en función del ángulo δ para E_o y V constantes.

La potencia máxima de un generador de rotor cilíndrico

drico se obtiene para $\delta = \frac{\pi}{2}$.

Bajo la influencia de la componente P_u el valor de la potencia máxima varía ligeramente y el ángulo, se desplaza a un valor tal que $\delta < \frac{\pi}{2}$.



Característica del ángulo de potencia de un alternador con polos salientes. $R_a = 0$

La potencia comprendida para un ángulo

$$0 < \delta < \pi$$

corresponde al comportamiento como generador, mientras que la comprendida para un ángulo

$$-\pi < \delta < 0$$

corresponde al comportamiento como motor.

El ángulo δ cambia continuamente cuando el rotor, no gira a velocidad sincrónica.

La potencia electromagnética es la que se transfiere desde el rotor de un generador sincrónico a su estator (del estator al rotor si se trata de un motor) a través del campo magnético del entrehierro.

Como hemos supuesto que $R_a = 0$, la pérdida es nula

y si llamamos P_m a la potencia electromagnética

$$P_m = P$$

La potencia electromagnética P_m es igual a la potencia P entregada por el alternador al circuito de potencia.

Cuando un generador está bajo carga, su rotor está sometido a la acción de freno del par electromagnético M_m cuyo valor se determina por P_m y por la velocidad mecánica angular del rotor Ω .

$$M_m = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{E_0 V}{\Omega X_d} \text{sen}$$

La tensión V no es solo la tensión en las bornes de la máquina, sino la tensión en cualquier punto de la línea de potencia, empleando en el cálculo la reactancia de la línea hasta el punto en que se mide V más la de la máquina.

$$X_d + X_L$$

$$X_q + X_L$$

en lugar de X_d y X_q , respectivamente.

b) Capacidad de sobrecarga estática

La carga de un alternador conectado a las barras colectoras de un sistema, no es constante. Varía continuamente debido a cambios de la carga de los usuarios, conexión y desconexión de aparatos, etc.

Durante los cambios en las condiciones de funcionamiento de una máquina sincrónica se producen en ella fenómenos transitorios y fenómenos de naturaleza-

sa estática.

Los fenómenos que tienen lugar muy lentamente son considerados como condiciones de funcionamiento estático, y las características del ángulo de potencia que corresponden a ella se denominan Características Estáticas.

Para estudiar las condiciones de funcionamiento estático, veamos las condiciones de operación en paralelo de un generador con

- excitación invariable. E_0 constante -
- alimentación a una barra colectora infinita -
- tensión de línea V y frecuencia f constantes -

Además, para simplificar consideremos una máquina de rotor cilíndrico ($X_d = X_q$).

La característica del ángulo de potencia de un generador de rotor cilíndrico cuando E_0 , V y f son constantes, se ilustra en la figura (17).

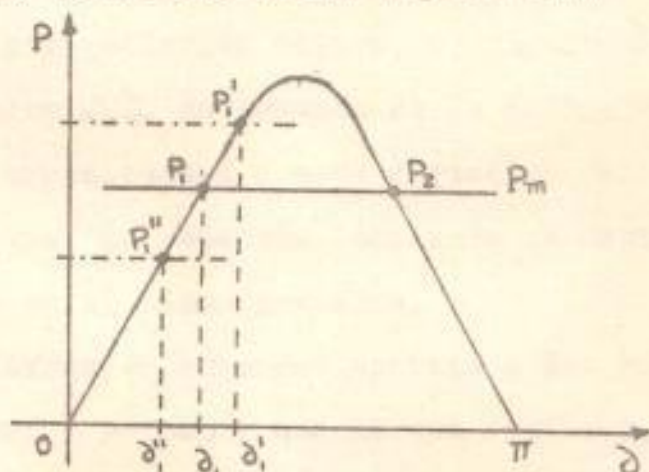


FIGURA (17)

Determinación de la capacidad de sobrecarga estática de un alternador sincrónico.

La potencia de salida de la máquina impulsora (menos las pérdidas mecánicas y en el acero) se designa por P_m , y si despreciamos las pérdidas en el circuito del alternador, se establece que

$$P = P_m$$

O sea, la potencia de salida P entregada al circuito de potencia por el generador en condiciones de régimen es igual a la potencia P_m entregada por la máquina impulsora.

La potencia P_m de la máquina motriz está representada por una recta en la figura (17). Además, es fácil ver que no depende del ángulo δ .

Las intersecciones de P_m con P indican en la figura dos condiciones probables de funcionamiento. Estudiemos ambas condiciones.

Punto 1.- supongamos que el rotor del generador, que funciona normalmente, es sometido a una aceleración por cualquier motivo, el ángulo δ aumenta en un valor $\Delta\delta$, un aumento de la salida del generador ΔP corresponderá a esta variación del ángulo en este punto. La potencia impulsora se mantiene en su valor en el mismo instante.

El alternador entonces entrega a las barras colectoras mayor potencia que la que recibe y, por consiguiente, el rotor se frena, el ángulo δ vuelve a su posición inicial y el alternador recupera la condición de funcionamiento estable en el punto 1.

Si por el contrario, el rotor sufre una desacelera-

ción, el ángulo δ disminuye, al igual que la potencia de salida del alternador, por lo que ahora está entregando a las barras colectoras una potencia menor que la que recibe, condición suficiente para que el rotor se acelere, el ángulo crezca y la máquina se estabilice en su punto de trabajo.

Resumiendo y observando la figura (17) resulta:

$$\begin{array}{ccc} \delta_1 \longrightarrow \delta'_1 & \Longrightarrow & P_1 \longrightarrow P'_1 \\ \delta'_1 > \delta_1 & & P'_1 > P_1 \end{array}$$

y

$$\begin{array}{ccc} \delta_1 \longrightarrow \delta''_1 & \Longrightarrow & P_1 \longrightarrow P''_1 \\ \delta''_1 < \delta_1 & & P''_1 < P_1 \end{array}$$

Punto 2.- haciendo las mismas suposiciones que para el punto 1, diremos que para el primer caso, si el rotor es sometido a una aceleración, el ángulo δ crece en un valor $\Delta\delta$, pero la potencia ahora, salida del generador, disminuye con la variación del ángulo en este punto. Ver figura (18).

El alternador en estas condiciones entrega menos potencia que la que recibe y, por consiguiente, el rotor se acelera más, el ángulo aumenta y la máquina se embala perdiendo sincronismo.

Por otro lado, una baja en la velocidad del rotor, producirá un incremento negativo en el ángulo δ y un aumento de la potencia de salida del alternador. La entrega por parte del alternador de una potencia mayor que la que recibe de su motor primario, hace que su rotor pierda más velocidad cada vez y que el

punto de trabajo se desplace, a través de la curva de potencia P , hasta el punto en donde la potencia adquiere un valor crítico y que es un punto de operación inestable, ya que el alternador no puede entregar una potencia mayor que la que recibe

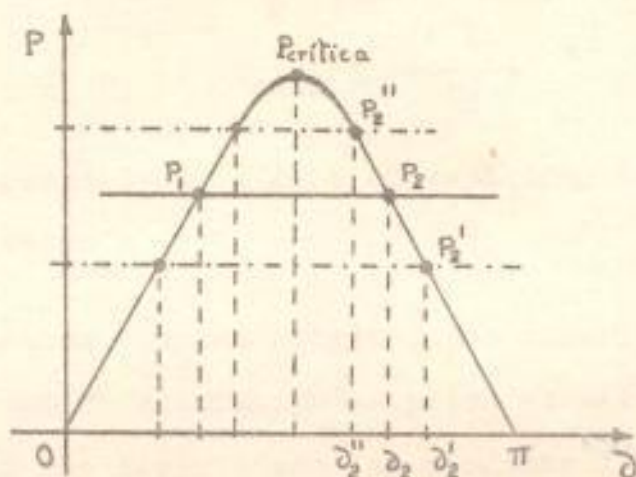


FIGURA (18)

Determinación del punto de trabajo inestable de un generador síncrono.

Observando la figura (18) y lo expresado anteriormente tenemos:

$$\delta_2 \xrightarrow{\delta_2' > \delta_2} \delta_2' \quad \Rightarrow \quad P_2 \xrightarrow{P_2' < P_2} P_2'$$

y

$$\delta_2 \xrightarrow{\delta_2'' < \delta_2} \delta_2'' \quad \Rightarrow \quad P_2 \xrightarrow{P_2'' > P_2} P_2''$$

El criterio para el funcionamiento estable del alternador síncrono en las condiciones anteriores, debe satisfacer la relación

$$\frac{\Delta P}{\Delta \delta} > 0 \quad \text{y, en el límite} \quad \frac{dP}{d\delta} > 0$$

En conclusión tenemos:

- la rama ascendente de la curva de P corresponde a las condiciones de funcionamiento estable -
- la rama descendente corresponde a las condiciones de funcionamiento inestable -
- la condición $\delta = \frac{\pi}{2}$ y, por consiguiente, la salida

$$P_{\max.} = \frac{E_0 V}{X_d}$$

corresponde al límite de capacidad de sobrecarga estática -

Recordemos que las conclusiones anteriores se deducen para un alternador de polos no salientes, en el que se han despreciado las pérdidas $I^2 R_a$, y que los parámetros V, E_0 y f son valores constantes.

En las máquinas de polos salientes la potencia máxima de salida es un poco mayor y el límite de estabilidad estática se logra para un ángulo $\delta < \frac{\pi}{2}$.

Se llama factor de capacidad de sobrecarga estática a la relación

$$K_m = \frac{P_{\max.}}{P_m}$$

y en las máquinas de rotor cilíndrico

$$K_m \approx \frac{1}{\text{Sen} \delta_m}$$

δ_m es el valor del ángulo δ bajo carga nominal. Suele estar comprendido entre 25° y 30° en los turbo alternadores, resultando para K_m un valor

$$K_m \approx 2,0$$

c) Límite de Potencia Estática

Como hemos visto, la potencia de una máquina sincrónica de rotor cilíndrico se expresa por la relación

$$P = \frac{E_o V}{X_d} \text{sen } \delta,$$

de aquí que se obtiene un valor de potencia máxima cuando $\delta = \frac{\pi}{2}$, de donde,

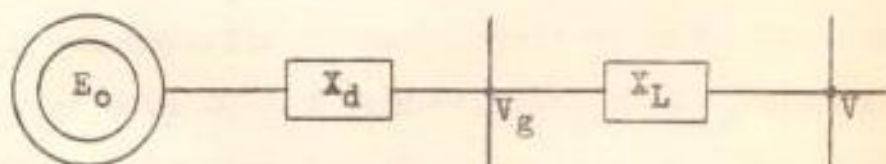
$$P_{\text{max.}} = \frac{E_o V}{X_d} .$$

Pero, gracias a ciertas condiciones, podemos demostrar en el laboratorio que valores distintos de potencia máxima son posibles, aún manteniendo las condiciones mecánicas de la máquina.

Observando la figura (19), en donde

- E_o es el voltaje producido por la corriente de excitación I_f -
- V_g es la tensión en las bornas del generador -
- V es la tensión en cualquier punto de la línea -
- X_d es la reactancia sincrónica del generador -
- X_L es la reactancia de la línea (desde el secundario del transformador hasta el punto en que se mide V) -

FIGURA (19)



Esquema de la relación entre E_o , V_g y V .

además

$$X_d = X_L$$

de donde

$$\bar{V}_g = \frac{\bar{E}_o + \bar{V}}{2},$$

podemos obtener los siguientes casos de límites de potencia:

1.- Límite de potencia estática - Sin Regulación -

Para este caso las condiciones son

$$\bar{E}_o \text{ y } \bar{V} \longrightarrow \text{constantes}$$

$$\bar{V}_g \text{ y } \delta \longrightarrow \text{variables}$$

y considerando las reactancias X_d y X_L , respectivamente, se cumple

$$\bar{V} < \bar{V}_g < \bar{E}_o$$

\bar{V}_g varía en función del ángulo δ , que a su vez cambia con la potencia que entrega la máquina.

También

$$\delta = \delta_{eg} = \delta_L$$

δ_{eg} es la componente del ángulo δ , formada entre \bar{V}_g y \bar{E}_o .

δ_L es la componente del ángulo δ , formada entre \bar{V} y \bar{V}_g .

En la figura (20), tomando el voltaje de línea como referencia, podemos apreciar que el promedio entre E_o , que describe un semicírculo de radio constante y centro en O, y V , determina la curva V_g que es el lugar geométrico de todas las tensiones que puede presentar el alternador en sus bornes, cuando se varía la potencia, consecuentemente el ángulo δ , y se mantiene constante E_o .

Si V_g toma valores intermedios en magnitud, su desfase, lógicamente, tendrá la misma relación.

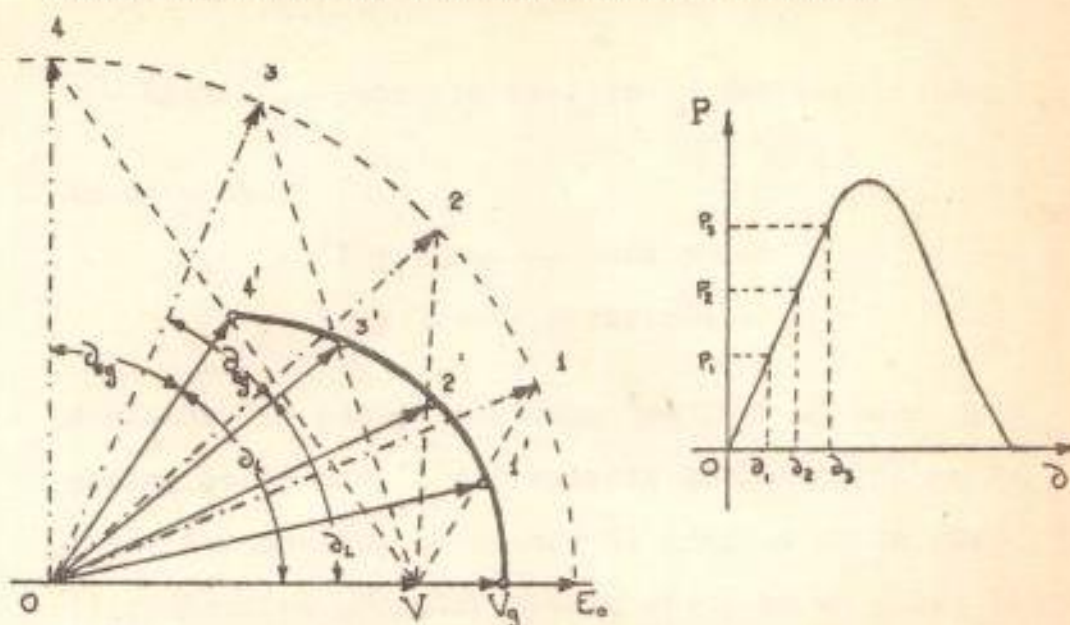


FIGURA (20)

Límite de potencia estática cuando E_0 permanece constante y el ángulo δ varía con la carga.

Los distintos valores del ángulo δ , que se corresponden con las diferentes potencias de trabajo, pueden observarse también en la curva de potencia de la máquina. Figura (20-b).

Además, podemos ver también que la potencia máxima se cumple para $\delta = \frac{\pi}{2}$, que es precisamente el ángulo con que se determina el mínimo valor posible de V_g , sin que la máquina pierda sus condiciones estables.

Es de notar, que siendo E_0 y V constantes, la potencia depende exclusivamente de la posición angular del campo excitatriz, respecto al campo inducido en el estator.

Entonces, para una condición de trabajo 1, la potencia estará dada por

$$P = \frac{E_0 V}{X_d} \text{sen } \delta_1$$

y para un punto de trabajo cualquiera, la potencia dependerá de δ .

2.- Límite de potencia estática - Con Regulación -

En este caso

$$\begin{aligned} V \text{ y } V_g &\longrightarrow \text{constantes} \\ E_o \text{ y } \delta &\longrightarrow \text{variables} \end{aligned}$$

Haciendo las consideraciones que para el caso 1, y además, estimando la conveniente inclusión de un regulador automático, obtenemos el gráfico de la figura (21). Aquí se puede observar, que para un valor determinado del ángulo δ , corresponde un valor de tensión inducida E_o y consecuentemente una potencia P .

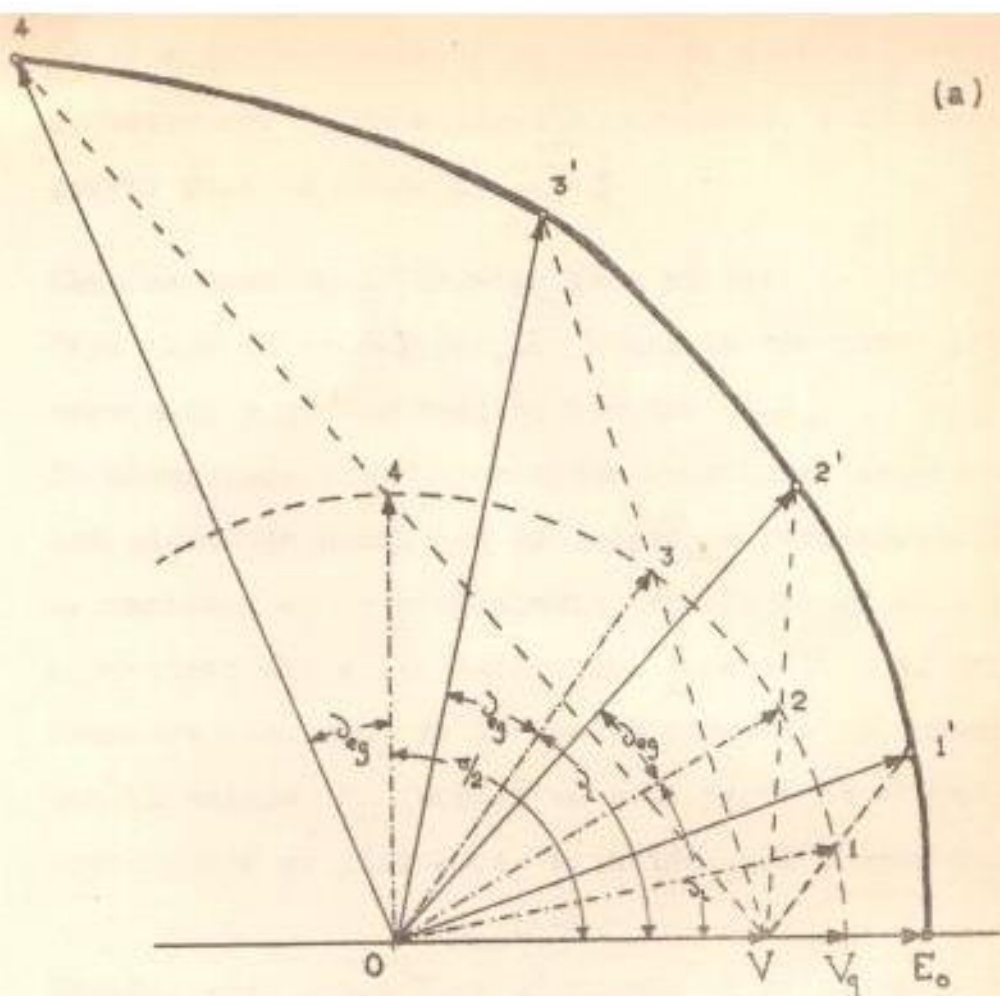
$$P_1 = \frac{E_o V}{X_d} \text{sen } \delta_1$$

Por otro lado, el vector V permanece constante y fijo, de tal manera que es la referencia para medir la variación del ángulo δ .

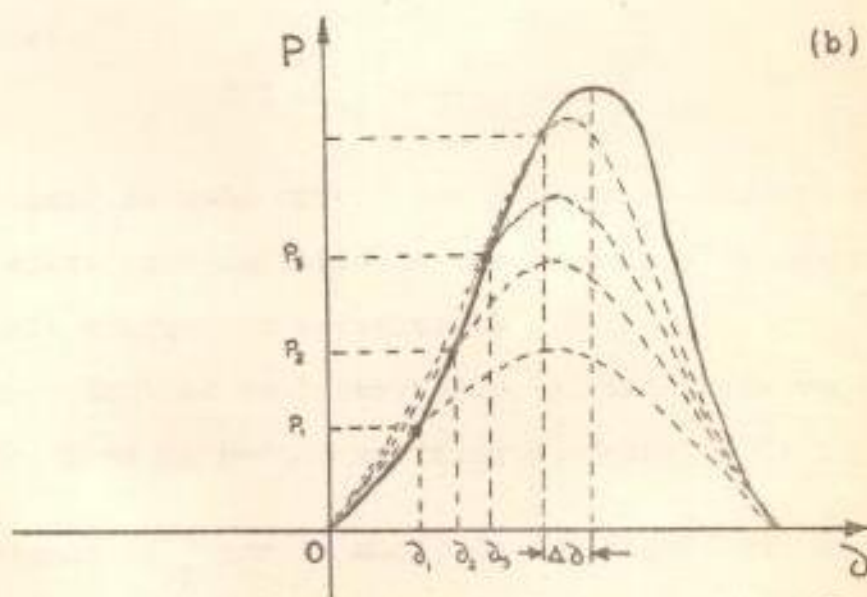
y describe un círculo de radio constante y centro g en O .

La línea que une V con cualquier punto de V_g (1, 2, etc.), es el promedio entre V y E_o .

La curva definida por E_o (resultado de unir los puntos 1', 2', etc.), es el lugar geométrico de todas las tensiones inducidas por la corriente de excitación, E_o , que puede presentar el alternador, cuando el voltaje en terminales permanece constante y el ángulo δ varía con la carga.



Esquema que muestra la relación entre los vectores V , V_g y E_o , cuando son variables el ángulo δ y la tensión E_o mientras que V y V_g permanecen constantes, en un alternador sincrónico.



Variación de la potencia en función del ángulo δ y la tensión E_o con regulación de voltaje

FIGURA (21)

De lo anterior se desprende, que la potencia crítica es mayor que la obtenida sin regulación y que, además, ocurre para un valor de $\delta > \frac{\pi}{2}$.

Esto se explica de la siguiente manera:

Para cada valor del ángulo δ existe una potencia determinada y que es función también de E_o .

Si observamos que V_g permanece constante, entonces los elementos sobre los que recae la responsabilidad de mantener en funcionamiento estable la máquina se encuentran entre los bornes del generador y el transformador encargado de la transmisión, de tal manera que el ángulo δ_L formado en esta parte es el que nos proporciona el límite de variación, que sucede cuando

$$\delta_L = \frac{\pi}{2}$$

Además, como entre V_g y E_o existe un desplazamiento angular, δ_{eg} , en virtud de la caída en la reactancia sincrónica de la máquina, y si recordamos que

$$\delta = \delta_{eg} + \delta_L$$

Entonces

$$\delta = \delta_{eg} + \frac{\pi}{2}$$

Se obtiene de esta manera una potencia adicional que solo sirve para análisis de laboratorio y se denomina potencia aparente o artificial.

En las prácticas de laboratorio, el valor máximo del ángulo δ se ha medido en valores alrededor de 115°

Se calcula δ_{eg} por la medición del ángulo respecto a la potencia en que se opera cada vez.

a) Conclusiones Generales

En esta parte de la Tesis, debo señalar que los resultados obtenidos en el desarrollo de las experiencias, sin ser irreales, tienen el carácter de ilustrativos, considerando que las prácticas se realizaron en base del material técnico existente en el Laboratorio.

En la ejecución de las pruebas se han escogido los métodos más recomendables y de mayor aplicación en los centros dedicados a esta clase de investigación.

Para el mejor desarrollo de las pruebas es necesario que los estudiantes de Potencia tengan en consideración los siguientes detalles:

Conocimiento en detalle de las máquinas en las que se van a realizar las experiencias. Para el efecto existen folletos ilustrativos.

Conocimiento de la parte teórica que se relaciona con la práctica.

Realización de las experiencias siguiendo un modelo establecido.

Conocimiento y manejo de los instrumentos que se utilicen en la experiencia.

Cálculo previsor de la magnitud de lo que se va a medir, para el uso conveniente de las es-

calas de los instrumentos de medida..

Revisión de las conexiones para cualquier clase de prueba y chequeo de los motores antes de ser arrancados.

Precauciones personales.

b) Observaciones de cada Prueba

Experiencia N°1

Para esta prueba debe tenerse presente que los mejores resultados obedecen a un deslizamiento muy pequeño. Debe regularse la velocidad del motor impulsor lentamente.

Debemos darnos cuenta que:

La aguja del amperímetro de c.a. oscila entre un máximo y un mínimo.

Es preferible que la oscilación sea lenta para evitar errores de lectura.

Variando la velocidad del motor impulsor la aguja del amperímetro se detiene para tres casos.

Experiencia N° 2

Esta prueba se desarrolla de manera muy simple porque el caso así lo requiere. La operación se reduce a manipular el reóstato que controla la corriente de excitación del alternador y a tomar lecturas en terminales.

Observe que sucede si cambia la velocidad.

Experiencia N° 3

Este caso dió una comprobación clara de lo estudiado en la teoría. La gráfica de los resultados obtenidos, fue una línea recta, que describe perfectamente la curva característica de cortocircuito.

Experiencia N° 4

Fue una experiencia muy interesante, en virtud de las características que el proceso presentó en su desarrollo.

Es preferible manipular lentamente los reóstatos de la excitación, hasta conseguir la corriente nominal como carga; condición que define el punto P de la curva.

Otros puntos, tales como P_1 , se obtienen, aumentando la excitación del alternador y disminuyendo la del motor, respectivamente.

Note como el punto P_1 , en la hoja de gráficos, no está en la curva. Esto se debe a que el factor de potencia no es exactamente igual a cero.

Experiencia N° 5

Es una de las pruebas recomendadas por el Código de ensayos de la AIEE para máquinas sincrónicas.

El campo, actuando libremente, conduce a una posición fija al rotor. Esta es la posición en que el flujo encuentra el camino de menor reluctancia. Fig. (a).

La otra posición debemos mantenerla girando el eje con la mano hasta dejar el eje en cuadratu-

ra con el campo.

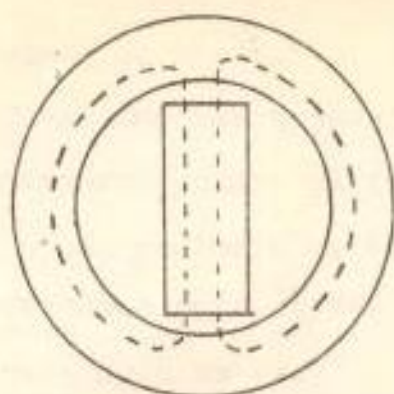


Fig. (a)

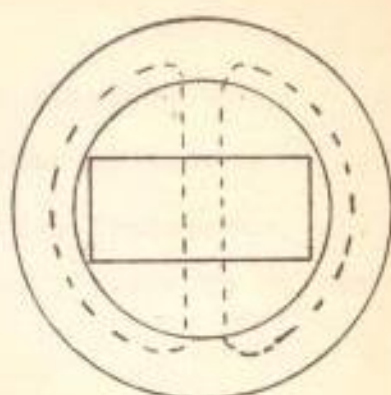


Fig. (b)

Experiencia N° 6

Medimos el ángulo de carga en esta prueba, debido a que no contábamos con un potenciómetro para obtener directamente la potencia de pérdida.

La secuencia es negativa, porque su presencia desacelera en parte al rotor.

Debemos hacer la medición un poco rápido para evitar recalentamiento del alternador.

Experiencia N° 7

Prueba en verdad muy sencilla que no requiere de mayor trabajo.

Recomiendo que la tensión aplicada en bornes sea menor que la de régimen (alrededor del 60 % de la nominal).

Pruebe el caso cuando el alternador está sin rotor.

Experiencia N° 8

En esta prueba y todas las que se refieren a conexiones a la red, si la tensión de la línea es

mayor que la que puede entregar el alternador, se intercalan transformadores entre los interruptores y la línea.

Cumplidas las condiciones de sincronización, las lámparas pueden quedar apagadas al cierre de S-1, lo más probable es que fluctúen lentamente. Aprovechamos para cerrar S-2, en el instante en que se apagan estas.

Sin cerrar S-2;

Observe cuando se varía la velocidad del alternador.

Observe cuando se cambia una fase.

Experiencia N° 9

Esta prueba no se pudo desarrollar por no contar nosotros con el Sincroscopio, elemento principal para la realización de la experiencia.

Experiencia N° 10

Siendo uno de los métodos poco usados, sin embargo, no deja de ser interesante esta prueba.

La resistencia que utilizamos para cortocircuitar el arrollamiento de excitación fue un reóstato de $100\Omega/2,4$ amp. Los resultados fueron favorables para algunos valores de esta.

El amperímetro señala el instante en que el alternador entra en sincronismo con la red.

Experiencia N° 11

Con esta experiencia entramos ya a lo que llamamos Estabilidad en las máquinas sincrónicas.

Es de observar que hemos recurrido a instrumen-

tos , tales como el Stroboscopio y el transformador de Sincronización.

El Stroboscopio es un aparato que emite una luz titilante, de frecuencia variable.

Si un eje gira a una velocidad cualquiera y en ese instante hacemos coincidir su frecuencia con la del Strobotac, por efecto optico, veremos como fija una señal establecida en el eje.

Una vez obtenida la señal es necesario sincronizar el Stroboscopio para que esta permanezca inmóvil. Se utiliza el Transformador de Sincronización, que no es mas que un transformador alimentado de una fuente de c. a. cualquiera y del cual se derivan voltajes (c a y c c) regulables.

Fijar la señal no fue tan fácil, debido a que las frecuencias no son del todo estables.

Experiencia N° 12

Haciendo la consideración de que el voltaje en terminales permanece constante durante la prueba y que $\varphi=0$, anotamos lo siguiente:

La tensión de excitación E, no es la que produce la potencia de salida.

Para que el alternador entregue potencia es necesario que el ángulo δ tome un valor diferente de cero.

Las diferentes cargas producen distintos ángulos de potencia, como pudimos comprobar en esta experiencia

Fitzgerald & Kingsley, Electric Machinery, Capítulo 9,
McGraw-Hill Co.

Kostenko & Piotrovsky, Maquinarias Eléctricas, Volumen
II, Capítulos 9 y 12, Montaner y Simón. S.A.

Kimbark, E. Wilson, Power System Stability: Synchronous
Machines, Volumen III, Capítulo 12, Dover Publications.
Inc.

Langsdorf, Alexander S., M. E. E., D. Sc., Teoría de
las Máquinas de Corriente Alterna, Capítulos 4, 10 y
12, McGraw-Hill Co.

Ricker and Tucker, Electrical Engineering Laboratory
Experiment, McGraw-Hill Co.

Universidad de Chile, Folleto Informativo del Laborato-
rio Docente de Electrotecnia, Publicación Nº 38.

Universidad Técnica de Dresde, Folletos para Prácticas
de Electrotecnia, Publicación DK-621.