



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**ANALISIS DE SISTEMAS ELECTRICOS
DE POTENCIA.**

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO - ELECTRICISTA
P R E S E N T A

24
112

Francisco Osorio Torres
Carlos H. Castro Ortega
Higinio Plata Cándido
José I. Sánchez Alberto

MEXICO, D. F.

1979



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

P R O L O G O

La operación moderna de los sistemas de potencia requieren del estudio del comportamiento de las unidades generadoras, primotores y alternadores, que producen energía eléctrica, esto es, la "materia prima" del sistema.

Por la naturaleza de la demanda eléctrica -- que es fundamentalmente cambiante, el sistema trabaja en condiciones que varían desde un estado casi - estático, hasta aquellos producidos por la varia---ción brusca de la carga y por fallas de aislamiento en los circuitos eléctricos.

El objetivo de la presente tesis es analizar los aspectos anteriores y a la vez despertar alguna inquietud que sirva para alguna investigación mas -- exhaustiva, con el principal interés de acelerar el crecimiento de la industria eléctrica.

La tesis se encuentra dividida en cuatro partes; la primera establece los conceptos básicos para poder comprender el funcionamiento de la máquina sín crona; en la segunda parte hablamos de la estabilidad del sistema, obteniendo una series de ecuaciones importantes para una aplicación posterior; en el capítulo número tres ó tercera parte nos referimos -

al control de carga y frecuencia, tomando con más interés el estudio del regulador de velocidad y los tipos de regulación automática que existen; y por lo que respecta a la última parte nos referimos a unos conceptos prácticos con respecto a la máquina síncrona, es decir estudiamos lo que comunmente se conoce como carta de operación de los generadores síncronos ó diagrama de capacidad, posteriormente en este capítulo anexamos un problema numérico para poder visualizar mejor dicho tema.

Para nuestro punto de vista nos atrevemos a decir que esta última parte, la consideramos de mayor interés por su interesante aplicación en las plantas generadoras, así como también por el mayor esfuerzo que nos originó para una mayor realización del mismo.

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

INTRODUCCION

Uno de los problemas más importantes en el suministro de energía eléctrica es el relacionado con la evolución de la demanda y la aglomeración de los centros de carga, porque estos conducen a la necesidad de hacer cada vez más complejo nuestro sistema.

Así, día con día se tienen que atender nuevas cargas, que cada vez crecen más y más, esto sucede de tanto en alta como en baja tensión, entre ellas podemos nombrar a las cargas de tipo residencial, de alumbrado público, temporal, etc., en baja tensión; y cargas agrícolas, de bombeo de aguas, de minas, industrial etc. en alta tensión.

Un sistema eléctrico de potencia (como el mostrado en la figura) es todo el conjunto de elementos necesarios para producir energía eléctrica, transportarla hasta los centros de carga y distribuirla entre los distintos consumidores; el sistema está constituido por plantas encargadas de generar la energía, redes de transmisión, distribución que sirven para conducirla y una gran diversidad de cargas, repartidas en una región o centro de consumo, así como por todo el equipo adicional, el cual hace posible que esa energía llegue a los clientes en forma y calidad apropiada y al menor precio posible.

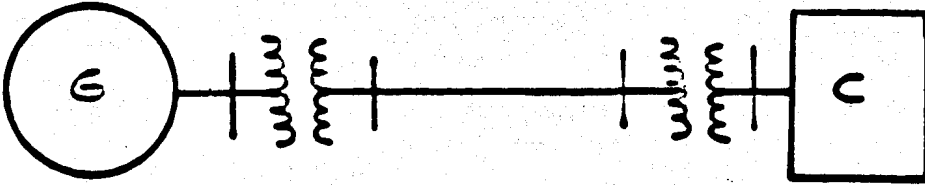


Diagrama unifilar de un sistema eléctrico

La calidad del suministro de energía eléctrica queda definida por los siguientes tres factores:

- 1) Continuidad del servicio
- 2) Regulación del voltaje
- 3) Control de frecuencia

Continuidad del servicio.- La energía eléctrica ha adquirido tal importancia en la vida moderna, que una interrupción de su suministro causa trastornos y pérdidas económicas insostenibles. Para asegurar la continuidad del suministro deben tomarse -- las siguientes principales disposiciones.

a) Disponer de la reserva de generación adecuada para hacer frente a la posible salida de servicio, o indisponibilidad, de cierta capacidad de generación.

b) Contar con un buen sistema automático para protección.

c) Disponer de los medios para restablecer rápidamente al servicio en el caso que se presente una interrupción del mismo.

d) Diseñar el sistema de tal manera que la falla o desconexión de un elemento tenga la menor repercusión posible en el resto del sistema.

e) Disponer de los circuitos de alimentación de emergencia para hacer frente a una falla en la alimentación normal.

Regulación de voltaje.- Los aparatos que funcionan con energía eléctrica están diseñados para operar a un voltaje determinado y su funcionamiento será satisfactorio siempre que el voltaje aplicado no varíe más allá de ciertos límites; es debido a este motivo que la regulación del voltaje en un sistema eléctrico puede tener una variación del $\pm 5\%$ del voltaje en los puntos de utilización, con respecto al voltaje nominal y se considera satisfactoria; y una variación de $\pm 10\%$ se considera tolerable.

Control de Frecuencia.- En general el equipo eléctrico de un sistema, principalmente los generadores y los transformadores están diseñados para funcionar a una frecuencia determinada y lo mismo puede decirse de los aparatos de utilización; El diseñarlos para poder funcionar en un rango de frecuencia mayor, por ejemplo de 50 Hz a 60 Hz aumenta su costo.

Al producirse una variación de la carga conectada al sistema, se produce un desequilibrio que se refleja en una variación de la velocidad de rotación de las máquinas y en consecuencia de la frecuencia. Los reguladores de velocidad o Gobernadores de cada turbina registran esta variación y actúan sobre las válvulas de admisión de fluido a la turbina, llegándose a un nuevo estado de equilibrio. Sin embargo este nuevo estado de equilibrio se establece a una frecuencia ligeramente distinta de la nominal debido a las características de operación de los reguladores de velocidad, necesarias para lograr que la operación de varias unidades se habrá alternado y en general no corresponderá a la distribución óptima.

Esto hace necesario un sistema de control adicional que restablezca la frecuencia a su valor nominal y reparta la generación entre las distintas unidades en la forma adecuada.

El lograr esto requiere un control de la frecuencia mucho mas preciso que el que seria necesario de acuerdo con las características de las cargas. -- Por esta razón los sistemas modernos controlan la -- frecuencia con una precisión del orden de ± 0.05 Hz.

C A P I T U L O I

ANALISIS DE LA MAQUINA SINCRONA

LA MAQUINA SINCRONA

La máquina síncrona desempeña un papel importante en los Sistemas Eléctricos de Potencia, por lo cual consideramos de vital importancia dedicarle un estudio a su operación como generador, ya que las características de los generadores influyen considerablemente en la estabilidad de los sistemas.

Los generadores Síncronos trifásicos de acuerdo a la construcción de su rotor se clasifican como: Máquinas de rotor liso ó cilíndricos y como máquinas de polos salientes.

Las máquinas de rotor cilíndrico, son empleadas en altas velocidades como son las accionadas por turbinas de vapor, turbinas de gas, etc., generalmente estas máquinas constan de 2 y 4 polos magnéticos en su rotor para velocidades de 3600 y 1800 R.P.M., respectivamente para una frecuencia de 60 Hz. y las velocidades de 3000 y 1500 respectivamente para una frecuencia de 50 Hz., mientras que las máquinas de polos salientes son de muy baja velocidad y cuentan con gran número de polos, de acuerdo a la siguiente relación.

$$P = \frac{120 f}{R.P.M}$$

Donde P = nos indica el número de polos

f = nos indica la frecuencia del sistema al que se desea conectar

R.P.M. = nos indica las revoluciones por minuto - del rotor.

El hecho de que las máquinas accionadas a altas velocidades tengan rotor liso, es debido principalmente al reducido número de polos y a los esfuerzos centrífugos que se presentarían a altas velocidades si fuera de polos salientes.

Las máquinas de polos salientes de baja velocidad generalmente son accionadas por turbinas hidráulicas y por motores diesel.

En las máquinas de alta velocidad o de rotor liso podemos apreciar un entrehierro uniforme en la periferia del rotor, este tipo de generador, por lo tanto, tiene una reluctancia magnética aproximadamente igual, sin importar la posición angular de el rotor con respecto a la fuerza magnetomotriz de armadura, mientras que en las máquinas de polos salientes podemos observar que el entrehierro no es uniforme, y que la reluctancia será menor en los ejes del campo, y será mayor en el espacio entre los polos, tal como se muestra en la figura I-1 (a y b)

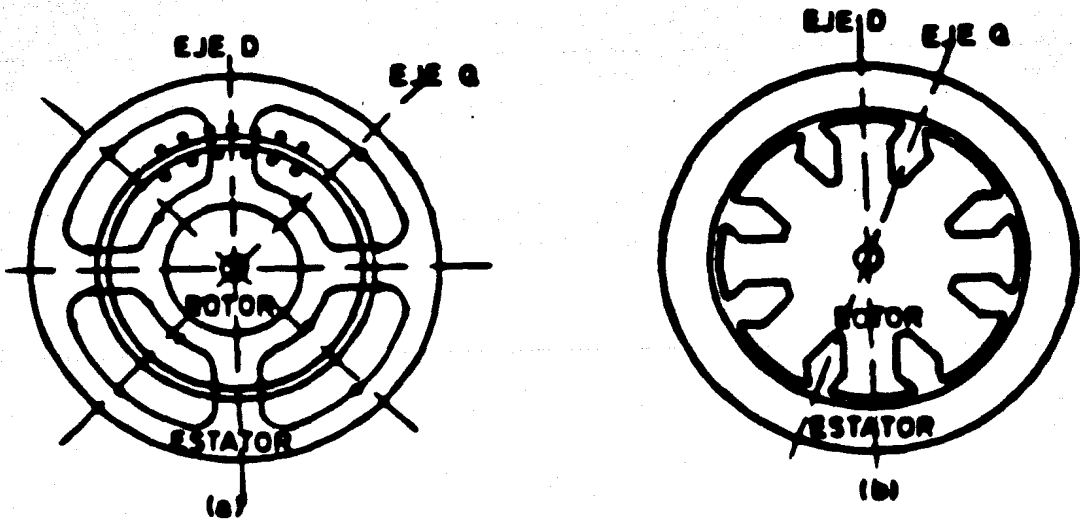


Fig. I-1.- Representación de una máquina síncrona.
a) De rotor cilíndrico
b) De polos salientes

OBTENCION DE LOS PARAMETROS DE LA MAQUINA SINCRONA
DE ROTOR CILINDRICO.

Determinaremos los parámetros de la máquina síncrona, para el análisis de su comportamiento en un sistema en estado estable. Los parámetros que --- constituyen a una máquina síncrona son:

- E_q = Tensión de excitación de los polos del campo
- E_t = Tensión nominal en las terminales de la máquina
- I = Corriente nominal de armadura
- θ = Angulo de factor de potencia
- δ = Angulo de potencia existente entre E_q y E_t
- I_q = Corriente de excitación en los polos de campo
- Z_s = Impedancia Síncrona de la máquina

El diagrama vectorial de una máquina síncrona de rotor cilíndrico, está representado en la figura I-2a .Puede observarse que la máquina de rotor -- cilíndrico, puede ser representado por medio de un - circuito equivalente, tal como se muestra en la figura I-2b

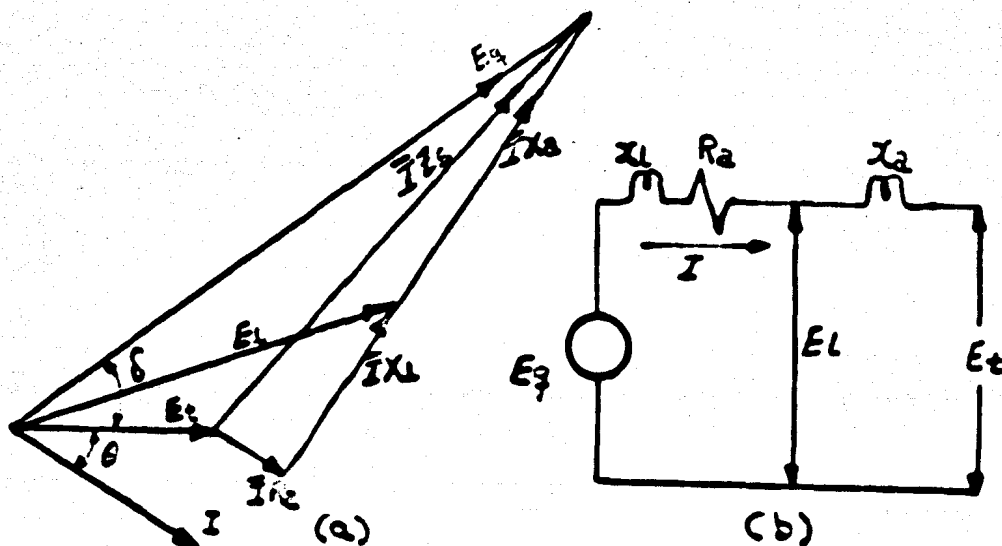


Fig. I-2 Diagrama vectorial y circuito equivalente de una máquina síncrona de rotor cilíndrico.

En el diagrama vectorial de la máquina síncrona y de su circuito equivalente, puede observarse que la impedancia síncrona se encuentra formada por dos reactancias y una resistencia que son X_1 , X_a y R_a . Donde X_1 corresponde a la reactancia de dispersión del flujo que atraviesa el entrehierro, X_a es la reactancia del devanado de armadura y R_a es la resistencia de armadura, por lo tanto la impedancia síncrona queda definida por estos tres parámetros. $Z_s = R_a + j(X_a + X_1)$. Para fines de nuestros cálculos despreciaremos la dispersión y la resistencia de armadura quedándonos finalmente $Z_s = 0 + jX_a$ que

llamaremos X_s ó reactancia síncrona de la máquina, - finalmente el diagrama vectorial y el circuito equivalente de la máquina síncrona de rotor cilíndrico - queda reducido a la forma que representa la figura - I-3a y I-3b

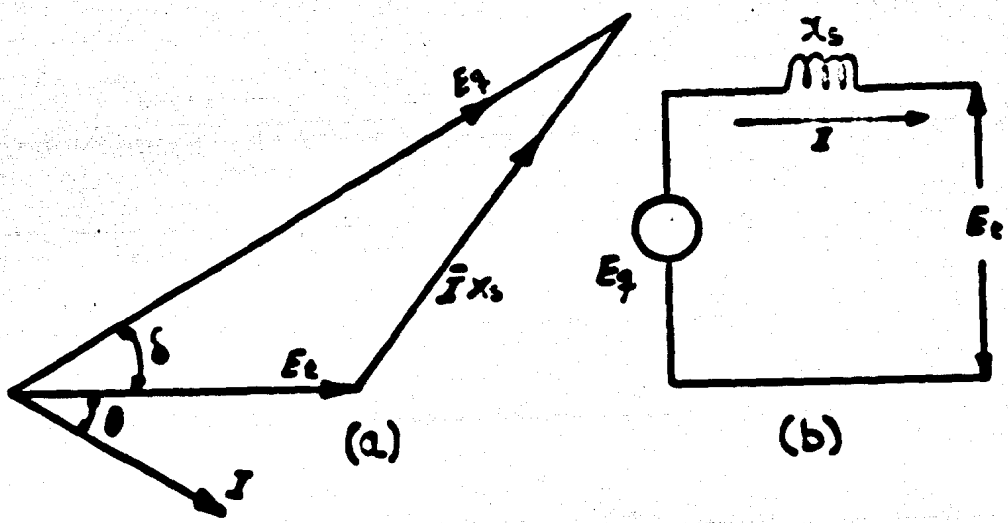


Fig. I-3 Diagrama Vectorial y circuito equivalente de una máquina síncrona de rotor cilíndrico despreciando dispersión y resistencia de armadura.

Para la obtención de los parámetros que nos definen el comportamiento de una máquina síncrona es necesario aplicar algunas pruebas que a continuación se definen.

PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO.- Esta prueba se efectua trabajando la máquina a velocidad nominal y con sus terminales en circuito abierto. Nos determina la variación de la tensión en las terminales de la máquina cuando se encuentra trabajando en vacio o sea --- cuando no circula corriente por el devanado de armadura. Esta tensión en las terminales será igual a la tensión de excitación E_q esto es debido a que como no existe corriente circulante en el estator, no habrá ninguna caída de tensión. Esta curva se logra -- variando la corriente de excitación I_q en el devanado de campo o del rotor. Inicialmente la curva presenta una variación lineal de la tensión con la variación de la corriente de excitación. Después se presenta la saturación en el devanado de campo hasta llegar a un valor en que la tensión permanece constante por más que se aumente la corriente de excitación. Esta curva característica de saturación en vacio se encuentra representada en la fig. 1-4 en ella se observa que si no se presenta el efecto de saturación, la curva característica sería una línea recta tal como se muestra en la figura 1-4. A esta línea se le llama "línea de entrehierro" puesto que queda determinada por el entrehierro .

Estas dos curvas proporcionan información de saturación que puede usarse para obtener valores correctos de las reactancias afectadas por la saturación, esto se puede lograr por medio de el empleo de

un factor de saturación, llamado "S" que es la relación que existe entre la corriente de campo requerida para una determinada tensión en la curva de saturación en vacío y la corriente de campo requerida para la misma tensión en la línea del entrehierro.

$$S = \frac{O_b}{O_a}$$

Como las máquinas síncronas tienen su mayor eficiencia operando en la rodilla de la curva de saturación en vacío, de esto se observa que el factor de saturación "S" es casi la unidad, es por ello, -- que para fines de nuestros cálculos despreciamos los efectos de saturación, considerando el factor de saturación como la unidad.

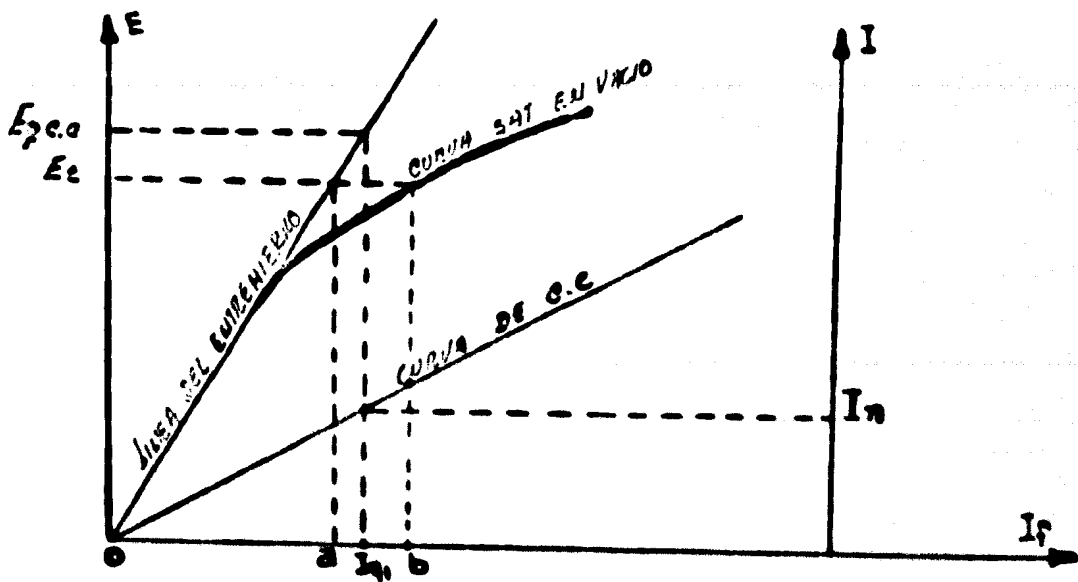


Fig. I-4 Curvas características de saturación en vacío y de corto circuito.

PRUEBA DE CORTO CIRCUITO.- Esta prueba se efectúa --
trabajando la máquina a velocidad nominal y con sus
terminales en circuito corto, intercalando en estas
terminales amperímetros para poder observar la variaci
ción de la corriente de armadura I con la variación
de la corriente de campo I_q . La curva característica
de esta prueba está representada en la figura I-4. -
Se puede observar que su característica es una línea
recta esto es debido a que la corriente de armadura
"I" se atraza un ángulo de 90° con respecto a la tens
sión de excitación E_q ya que la carga es puramente -
inductiva (jX_s), refiriéndonos a la figura I-3b verem
os que en condiciones de corto circuito la tensión
en las terminales de la máquina E_t , es cero, por lo
tanto $E_q = I(jX_s)$, como existe un ángulo de atrazo -
de 90° de la corriente con respecto a la tensión de -
excitación, se producirá un flujo o reacción de armam
adura opuesto al flujo del campo magnético, evitando
así la saturación magnética de la máquina.

De la curva característica de corto circuito
podemos observar que es necesaria una corriente de -
excitación I_q para establecer un punto a corriente -
nominal I , en la curva, y podemos ver que para esta
misma corriente de excitación obtenemos una tensión
 E_q c.c. en la curva característica de circuito abiert
o sobre la línea del entrehierro. Por lo tanto podem
os obtener el valor de la reactancia síncrona para

condiciones de NO saturación a valor nominal de ---
 acuerdo a la relación:

$$X_s = \frac{E_q \text{ c.c.}}{I}$$

Esta reactancia sincrona también la podemos expresar
 en p. u.

$$X_s = \frac{E_q \text{ c.c.}}{I_{nom.}} \times \frac{I_{nom.}}{E_{tnom.}} = \frac{E_q \text{ c.c.}}{E_t} \quad (p.u.)$$

La reactancia sincrona también la podemos represen-
 tar en función de la corriente de excitación quedan-
 do:

$$X_s \text{ p.u.} = \frac{I_{q_1}}{O_a}$$

donde I_{q_1} es la corriente de excitación necesaria --
 para producir la corriente nominal en la curva de --
 corto circuito y \bar{O}_a es la corriente de excitación ne-
 cesaria para producir la tensión nominal en la línea
 del entrehierro, como se muestra en la fig. 1-4.

RELACION DE CORTO CIRCUITO (RCC).- La relación de -
 CORTO CIRCUITO nos proporciona información concer---
 niente al estado estable o permanente, potencia máxi-
 ma en condiciones de corto circuito y la regulación
 de voltaje o las demandas para un regulador de volta-
 je. La relación de corto circuito se define como el
 cociente entre la corriente de excitación necesaria
 para producir la tensión nominal en la curva de satu

ración en vacío, y la corriente de excitación necesaria para producir la corriente nominal de armadura - en la curva de circuito corto fig. I-4

$$RCC = \frac{\overline{O_b}}{I_{q_1}}$$

Pero sabemos que

$$S = \frac{\overline{O_b}}{\overline{O_a}}$$

Sustituyendo S en RCC nos queda

$$RCC = \frac{\overline{O_a}}{I_{q_1}} S = \frac{S}{X_s}$$

Pero como para efectos de saturación despreciables - hemos supuesto que el factor de saturación "S" es -- igual a la unidad, por lo tanto la relación de corto circuito para nuestros fines será igual al valor inverso de la reactancia síncrona.

$$R.C. C. = \frac{1}{X_s}$$

En las máquinas síncronas de rotor cilíndrico, las reactancia en eje directo y en cuadratura (X_d , X_q) - son iguales debido a que la longitud del entrehierro es constante, por lo tanto.

$$X_d = X_q = X_s$$

POTENCIA TERMINAL DE UN GENERADOR SINCRONO DE ROTOR CILINDRICO

Una máquina síncrona cualquiera puede definirse por medio de su ecuación general:

$$S = A + B + C$$

donde:

$$S = P + jQ$$

$$A = X e^{ja} \text{ ----- (I-1)}$$

$$X = \left(\frac{E_t^2}{2} \right) \frac{\Delta}{\Sigma} X_{d,q}$$

$$a = -\frac{\pi}{2}$$

$$B = \bar{I} e^{jb} \text{ ----- (I-2)}$$

$$\bar{I} = \left(\frac{E_t^2}{2} \right) \frac{\Delta}{\Sigma} X_{d,q}$$

$$b = \frac{\pi}{2} - \alpha$$

$$C = \bar{c} e^{jk} \text{ ----- (I-3)}$$

$$\bar{c} = \frac{E_q E_t}{X_d}$$

$$c = \frac{\Delta}{\Sigma} - \delta + c'$$

siendo:

Δ = diferencia

Σ = suma

\bar{I} = producto

E_q = voltaje interno

E_t = voltaje terminal

X_d = reactancia síncrona en eje directo

X_q = reactancia síncrona eje en cuadratura

δ = ángulo de potencia.

Para poder determinar si la ecuación general se refiere a un motor, generador, o a un condensador síncrono, se toma en cuenta el ángulo que forma el voltaje interno E_q y el voltaje terminal E_t (que suele tomarse como referencia) así tenemos que cuando:

a). - $\angle E_q > \angle E_t \therefore \delta > 0$ y $c' = 0$ esto implica que se trata de un generador.

b). - $\angle E_q < \angle E_t \therefore \delta < 0$ y $c' = 0$ esto implica que se trata de un motor.

c). - $\angle E_q = \angle E_t \therefore \delta = 0$ y $c' = \pi/2$ esto implica que se trata de un condensador síncrono.

Como se dijo anteriormente

$X_d = X_q = X_s \Rightarrow$ que se trata de un generador de rotor cilíndrico.

Para nuestro estudio trabajaremos a la máquina síncrona como generador por lo tanto nuestro ángulo de potencia δ será siempre mayor que cero.

Sustituyendo las ecuaciones I-1, I-2, y I-3 en la ecuación general tendremos:

$$S = \frac{E_t^2}{2} \left(\frac{X_d + X_d}{X_d} \right) e^{i(\pi/2)} + \frac{E_t^2}{2} \left(\frac{X_d - X_d}{X_d} \right) e^{i(\pi/2 - 2\delta)} + \frac{E_t E_q}{X_d} e^{i(\pi/2 - \delta)}$$

$$S = \frac{E_t^2}{X_d} e^{i(\pi/2)} + \frac{E_t E_q}{X_d} e^{i(\pi/2 - \delta)} = A + C$$

o también

$$S = \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q}{X_d} e^{j(\pi/2 - \delta)} - j \frac{\bar{E}_t^2}{X_d} \text{----- (I-4)}$$

La ecuación I-4 es la ecuación que nos determina la potencia terminal de un generador síncrono de rotor cilíndrico. Para demostrar lo anterior nos basaremos en el diagrama fasorial de tensiones y corrientes (Fig. I-3a) de dicho generador.

La potencia aparente producida por el generador viene expresada por:

$$S = E_t \hat{T} \text{----- (I-5)}$$

donde

S = potencia aparente

E_t = voltaje terminal de la máquina

\hat{T} = conjugado de la corriente.

De nuestro diagrama fasorial tenemos que:

$$E_q = E_t + j I X_d$$

donde

$$I = \frac{E_q - E_t}{jX_d}$$

cuyo conjugado será

$$\hat{T} = \frac{E_q - E_t}{-jX_d}$$

$$\hat{T} = \frac{E_q (E_q - E_t) - E_t^2}{-jX_d} ; -\delta = E_t - E_q$$

$$\hat{T} = \frac{E_q e^{-j\delta} - E_t}{-jX_d} \text{----- (I-6)}$$

Sustituyendo la ecuación (I-6) en (I-5) tenemos que:

$$S = \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q e^{-j\delta}}{-jX_d} - \frac{\bar{E}_t^2}{-jX_d}$$

$$S = \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q}{X_d} e^{j(\frac{1}{2}-\delta)} - \frac{j \bar{E}_t^2}{X_d} \text{ ----- (I-7)}$$

Como se podrá observar; la ecuación (I-4) es idéntica a la ecuación (I-7); por lo que queda demostrado que la ecuación (I-4) determinada a partir de la ecuación general es la ecuación de la potencia terminal para un generador síncrono de rotor cilíndrico.

DIAGRAMA P-Q, O CIRCULAR PARA MAQUINAS SINCRONAS.

Representación del diagrama; la potencia eléctrica aparente S, tiene dos componentes de potencia que son la potencia "P" llamada activa o real y la potencia "Q" llamada reactiva, por lo que finalmente la potencia eléctrica toma la siguiente forma.

$$S = P + jQ$$

Lo cual nos permite representarla sobre un sistema de ejes coordenados, en donde las abscisas toman el lugar de la potencia real "P", y las ordenadas toman el lugar de la parte imaginaria "Q".

La potencia nominal de un dispositivo eléctrico la podemos representar como el producto de $E_n I_n$, donde E_n nos representa el voltaje nominal del dispositivo e I_n nos representa la corriente nominal de dicho dispositivo. Al coseno del ángulo que se forma entre los fasores E e I, se le denomina factor de potencia.

El fasor de potencia aparente se encuentra definido por la siguiente expresión.

$$S = \bar{S} e^{j\theta} = \bar{S} \cos \theta + j \bar{S} \sin \theta$$

Donde el valor absoluto del fasor S no se altera al variar el ángulo θ . Por lo tanto el lugar geométrico de la potencia aparente es una circunferencia, debido a esto también se le ha dado por llamarle Diagrama Circular.

Dependiendo de la posición en que se encuentra el fasor S en nuestro diagrama, debido a sus componentes P y Q , se pueden determinar las siguientes condiciones que rigen a nuestro Diagrama Circular.

- 1.- a) Si nuestro dispositivo eléctrico trabaja como motor entonces nuestro fasor se debe de encontrar en el II o en el III cuadrante y además nuestro dispositivo se encuentra absorbiendo potencia activa.
- b) Si nuestro dispositivo eléctrico trabaja como generador entonces nuestro fasor se debe encontrar en el I o en el IV cuadrante y además nuestro dispositivo se encuentra produciendo potencia activa.
- 2.- a) Si nuestro dispositivo eléctrico trabaja sobre excitado entonces nuestro fasor se encuentra re presentado en el I o II cuadrante.
- b) Si nuestro dispositivo eléctrico trabaja sub-excitado entonces nuestro fasor se encuentra re presentado en el III o en el IV cuadrante.

Las condiciones anteriores las podemos ver en la --
Fig. I-5

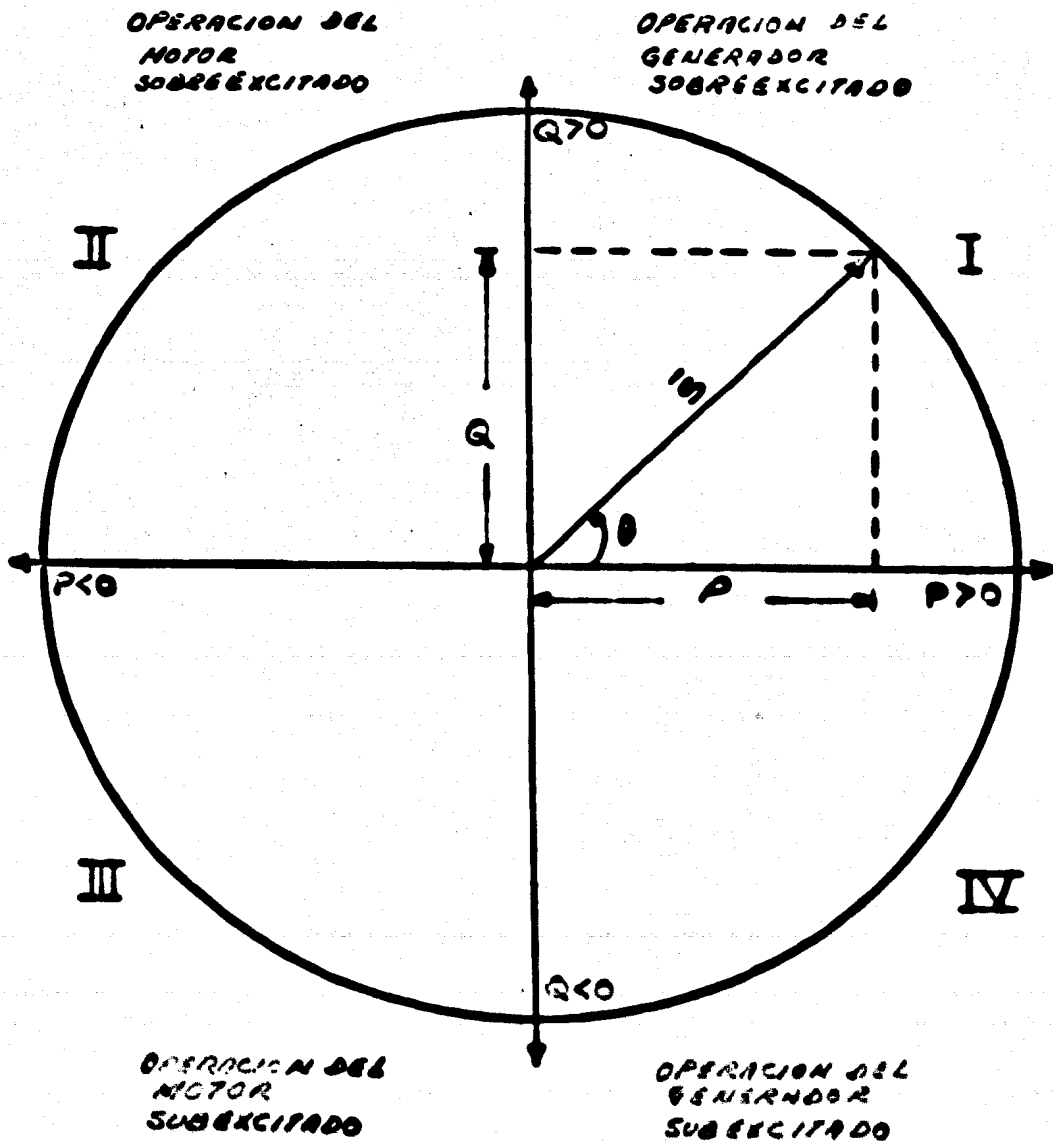


Fig. I-5 Diagrama circular para una máquina síncrona.

27

OBTENCION DE LOS PARAMETROS DE LA MAQUINA
SINCRONA DE ROTOR DE POLOS SALIENTES.

El comportamiento de una máquina generadora síncrona de polos salientes, es de una manera similar al comportamiento de un generador síncrono de rotor cilíndrico, y las pruebas aplicadas para la determinación de las constantes de la máquina de rotor cilíndrico, son en su mayoría aplicables a la máquina de polos salientes, la única variación en los parámetros de la máquina de polos salientes se presenta en el valor de la componente en cuadratura de la reactancia síncrona que en éste caso es menor que la reactancia en cuadratura de la máquina de rotor cilíndrico, esto es debido a que en la máquina de polos salientes el entrehierro existente entre el rotor y el estator NO ES UNIFORME, teniendo una reluctancia menor en el eje polar o eje directo, y una reluctancia mayor en el eje interpolar o en cuadratura, esto se muestra en la Fig. I-b)

Un diagrama vectorial para la máquina de rotor de polos salientes se encuentra representado en la Fig. I-6.

Las literales usadas para representar la tensión de excitación, tensión en las terminales de la máquina, corriente de armadura, ángulo de factor de potencia, ángulo de potencia, etc., empleadas para la máquina de rotor cilíndrico, serán empleadas también para la

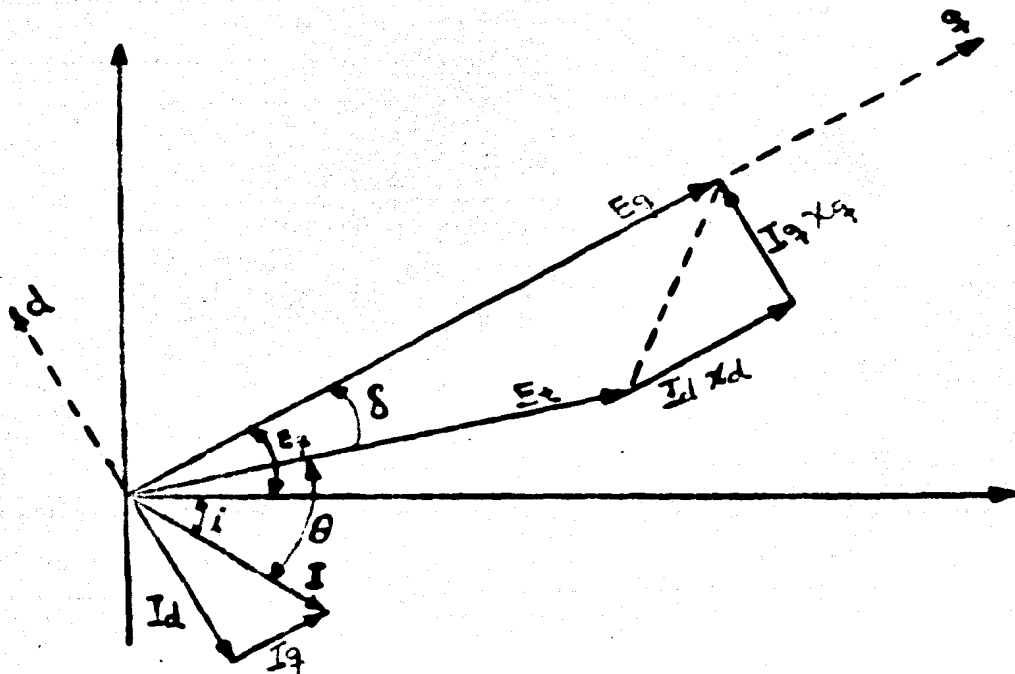


Fig. I-6 Representación vectorial de un generador síncrono de rotor de polos salientes.

máquina de polos salientes, con la excepción de la reactancia síncrona, que en este caso estará representada por sus dos componentes, en eje directo y en eje en cuadratura. Las literales empleadas para representar estas reactancias serán:

X_d = Reactancia síncrona en eje directo

X_q = Reactancia síncrona en eje en cuadratura.

Para la máquina de polos salientes la obtención de la reactancia síncrona en eje directo, es de la misma manera que la obtención de la reactancia síncrona en la máquina de rotor cilíndrico, pudiéndose efectuar en la máquina de polos salientes las mismas pruebas que se efectuaron para la obtención de la reactancia síncrona en la máquina de rotor cilíndrico; la obtención

de la reactancia síncrona en cuadratura es un poco - más difícil, esta puede ser sacada por medio de una prueba de deslizamiento.

PRUEBA DE DESLIZAMIENTO.- Esta prueba se efectúa para la determinación de la reactancia síncrona en eje de cuadratura, y se lleva a cabo haciendo girar el rotor de la máquina por medio de una fuerza mecánica a una velocidad angular ligeramente distinta a la del campo producido por la armadura, cuando a ésta se le aplica tensiones polifásicas balanceadas. La Fmm de la armadura se aplica en secuencia a los circuitos magnéticos de eje directo y de eje en cuadratura. La corriente de armadura varía como resultado de estas reactancias de magnitud variable. La magnitud de las corrientes serán mínimas cuando la reactancia sea máxima, y la corriente será máxima cuando la reactancia sea mínima.

El valor de X_q se determina por la relación de:

$$X_q = \frac{V_{\min}}{I_{\max}}$$

Y de manera similar X_d se determina por la relación de:

$$X_d = \frac{V_{\max}}{I_{\min}}$$

Un valor muy aproximado o común de la reactancia síncrona en el eje de cuadratura es:

$$X_q = 0.6 X_d$$

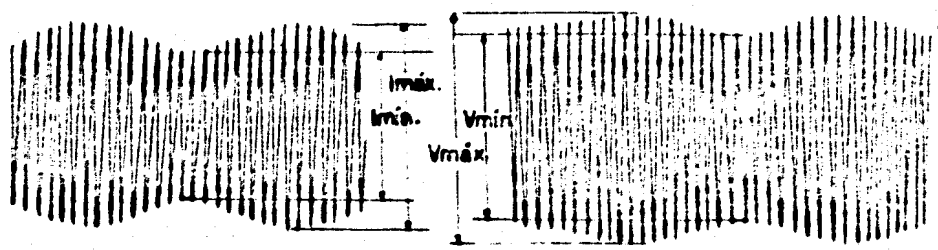


Fig. 1-7 Procedimiento para el cálculo de la reactancia sincrónica en cuadratura para una máquina sincrónica de rotor de polos salientes.

POTENCIA TERMINAL DE UN GENERADOR SINCRONO DE ROTOR DE POLOS SALIENTES

Partiendo nuevamente de la ecuación general de la máquina sincrónica tenemos que:

$$S = A + B + C$$

Sustituyendo los valores de A, B y C nos queda

$$S = \left(\frac{\bar{E}_t^2}{Z} \right) \frac{X_d}{X_q} e^{-j\frac{\pi}{2}} + \left(\frac{\bar{E}_t^2}{Z} \right) \frac{X_q}{X_d} e^{j(\frac{\pi}{2}-\delta)} + \frac{\bar{E}_q \bar{E}_t}{X_d} e^{j(\frac{\pi}{2}-\delta)} \dots \dots \dots (1-8)$$

Como se dijo anteriormente y a manera de recordatorio tenemos que para un generador sincrónico de rotor de polos salientes la reactancia en eje directo es diferente

de la reactancia en eje de cuadratura ($X_d \neq X_q$), --- aplicando este concepto y desarrollando la ecuación I-8 nos queda:

$$S = \frac{-j \bar{E}_t^2}{2} \left(\frac{X_d + X_q}{X_d X_q} \right) + \frac{\bar{E}_t^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \cos 2\delta + \frac{\bar{E}_q \bar{E}_t}{-X_d} \cos \delta + j \left[\frac{\bar{E}_t^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \sin 2\delta + \frac{\bar{E}_q \bar{E}_t}{X_d} \sin \delta \right] \quad \text{--- (I-9)}$$

La ecuación I-9 es la ecuación que nos representa la potencia terminal en un generador síncrono de rotor de polos salientes; para demostrar lo anterior nos basaremos en el diagrama fasorial de voltaje y corriente de dicho generador (Fig. I-6).

La potencia aparente producida por el generador viene expresada por:

$$S = E_t \hat{I}$$

Donde nuevamente

S = potencia aparente

E_t = voltaje terminal

\hat{I} = conjugado de la corriente

De nuestro diagrama tenemos que:

$$E_t = E_q - j I_d X_d - j I_q X_q \quad \text{--- (I-10)}$$

Representando los siguientes términos en forma de fasores nos queda:

$$E_t = \bar{E}_t e^{j(\theta - \delta)} = E_t e^{j\theta}$$

$$I = \bar{I} e^{-j(\lambda)} = I_d + I_q$$

$$I_d = \bar{I}_d e^{j(\theta - \lambda/2)}$$

$$I_q = \bar{I}_q e^{j(\epsilon_q)}$$

Por lo tanto:

$$I = \bar{I}_d e^{j(\epsilon_d - \pi/2)} + \bar{I}_q e^{j(\epsilon_q)}$$

Sacando el conjugado a la corriente tenemos:

$$\hat{I} = \bar{I}_d e^{-j(\epsilon_d - \pi/2)} + \bar{I}_q e^{-j(\epsilon_q)} \quad \text{----- (I-11)}$$

Sustituyendo la ecuación (I-11) en la ecuación de la potencia aparente nos queda:

$$S = \bar{E}_t e^{j(\epsilon_p - \delta)} \left[\bar{I}_d e^{-j(\epsilon_d - \pi/2)} + \bar{I}_q e^{-j(\epsilon_q)} \right]$$

Desarrollando tenemos:

$$S = \bar{E}_t e^{j(\epsilon_p - \delta)} \bar{I}_d e^{-j(\epsilon_d - \pi/2)} + \bar{E}_t e^{j(\epsilon_p - \delta)} \bar{I}_q e^{-j\epsilon_q}$$

$$S = \bar{E} \cdot \bar{I}_d e^{j(\pi/2 - \delta)} + \bar{E}_t \bar{I}_q e^{-j\delta}$$

$$S = \bar{E}_t e^{-j\delta} (\bar{I}_q + j \bar{I}_d) \quad \text{----- (I-12)}$$

Nuevamente de nuestro diagrama

$$E_q = E_t \cos \delta + I_d X_d$$

Por lo cual

$$I_d = \frac{E_q - E_t \cos \delta}{X_d} \quad \text{----- (I-13)}$$

Del mismo modo

$$E_t \sin \delta = X_q I_q$$

$$I_q = \frac{E_t \sin \delta}{X_q} \quad \text{----- (I-14)}$$

Sustituyendo (I-13) y (I-14) en (I-12)

$$= \bar{E}_t e^{-j\delta} \left[\frac{\bar{E}_t \operatorname{sen} \delta}{X_q} + j \frac{\bar{E}_q - \bar{E}_t \cos \delta}{X_d} \right]$$

Desarrollando nos queda:

$$= \frac{\bar{E}_t^2 e^{-j\delta} \operatorname{sen} \delta}{X_q} + j \frac{\bar{E}_t e^{-j\delta} \bar{E}_q}{X_d} - j \frac{\bar{E}_t^2 e^{-j\delta} \cos \delta}{X_d}$$

$$= \frac{\bar{E}_t^2 (\cos \delta - \operatorname{sen} \delta) \operatorname{sen} \delta}{X_q} + j \frac{\bar{E}_t (\cos \delta - \operatorname{sen} \delta) \bar{E}_q}{X_d} -$$

$$- j \frac{\bar{E}_t^2 (\cos \delta - \operatorname{sen} \delta) \cos \delta}{X_d}$$

$$= \frac{\bar{E}_t^2 \cos \delta \operatorname{sen} \delta - \bar{E}_t^2 \operatorname{sen}^2 \delta}{X_q} + j \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q \cos \delta}{X_d} -$$

$$- j \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q \operatorname{sen} \delta}{X_d} - j \frac{\bar{E}_t^2 \cos^2 \delta}{X_d} + j \frac{\bar{E}_t^2 \cos \delta \operatorname{sen} \delta}{X_d}$$

$$= \bar{E}_t^2 \cos \delta \operatorname{sen} \delta \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) + \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q \operatorname{sen} \delta}{X_d} +$$

$$+ j \left[\frac{\bar{E}_t \bar{E}_q \cos \delta}{X_d} - \frac{\bar{E}_t^2 \operatorname{sen}^2 \delta}{X_q} - \frac{\bar{E}_t^2 \cos^2 \delta}{X_d} \right]$$

Además sabemos que:

$$\operatorname{sen} \delta \cos \delta = 1/2 \operatorname{sen} 2\delta$$

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

$$\cos^2 \delta = 1/2 \cos 2\delta + 1/2$$

$$= \bar{E}_t^2 \operatorname{sen} 2\delta \left(\frac{X_d - X_q}{2 X_d X_q} \right) + \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q \operatorname{sen} \delta}{X_d} +$$

$$+ j \left[\frac{\bar{E}_t \bar{E}_q \cos \delta}{X_d} - \bar{E}_t^2 \left(\frac{1}{2X_d} \cos 2\delta + \frac{1}{2X_d} + \frac{1}{2X_q} - \frac{1}{2X_q} \cos 2\delta \right) \right]$$

$$S = \frac{\bar{E}_t^2}{2} \sin 2\delta \left(\frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \right) + \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q}{X_d} \sin \delta +$$

$$+ j \left[\frac{\bar{E}_t \bar{E}_q \cos \delta}{X_d} + \frac{\bar{E}_t^2 \cos 2\delta}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) - \frac{\bar{E}_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right) \right]$$

Finalmente nuestra ecuación de la potencia terminal de un generador síncrono de rotor de polos salientes, toma la siguiente forma:

$$S = \frac{\bar{E}_t^2}{2} \sin 2\delta \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) + \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q}{X_d} \sin \delta +$$

$$+ j \left[\frac{\bar{E}_t \bar{E}_q \cos \delta}{X_d} + \frac{\bar{E}_t^2 \cos 2\delta}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) - \frac{\bar{E}_t^2}{2} \left(\frac{X_q + X_d}{X_d X_q} \right) \right] \dots \dots \dots (I-15)$$

o también la ecuación de la potencia terminal la podemos expresar en una forma más familiarizada como:

$$S = - j \frac{\bar{E}_t^2}{2} \frac{(X_d + X_q)}{X_d X_q} + 1/2 \bar{E}_t^2 \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) (\sin 2\delta +$$

$$+ j \cos 2\delta) + \frac{E_q \bar{E}_t}{X_d} (\sin \delta + j \cos \delta) \dots \dots (I-16)$$

Como se podrá observar la ecuación (I-16) es idéntica a la ecuación (I-9); por lo que podemos decir que queda demostrado que la ecuación (I-9) determinada a partir de la ecuación general es la ecuación que nos determina la potencia terminal para un generador sín cróno de rotor de polos salientes.

CAPITULO II

ESTABILIDAD DEL SISTEMA

ESTABILIDAD DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA.

El problema de la estabilidad adquiere cada día más, una gran importancia dentro de los Sistemas Eléctricos de Potencia, a medida que estos crecen, sus interconexiones resultan mas complejas haciendo cada vez más difícil el mantenimiento del sincronismo, entre sus diversas partes, al ocurrir una perturbación en algún punto de su extensa red. La estabilidad para un sistema eléctrico de potencia según el "American Institute of Electrical Engineers" es el atributo del sistema, o parte de él, que le permite desarrollar en sus elementos fuerzas restauradoras iguales o mayores que las fuerzas perturbadoras, que permitan establecer un estado de equilibrio entre los elementos.

El estudio de la estabilidad de un sistema requiere del conocimiento de las características de operación de todos sus elementos y se efectúa para determinar la habilidad de las unidades generadoras para mantenerse en sincronismo durante perturbaciones graduales o transitorias y cambio en la red.

Cuando una máquina síncrona trabaja en condiciones estables existe un equilibrio entre la potencia mecánica entregada por la turbina y la potencia eléctrica tomada del generador, de hecho despreciando pérdidas deberá cumplirse la siguiente relación.

Potencia Mecánica = Potencia Eléctrica

Quando el sistema pierde el equilibrio entre las dos potencias en forma momentaneas, pero con recuperaci3n r3pida, se dice que el sistema es estable; - pero cuando no pose3 esa habilidad para recuperar su balance se dice que el sistema es inestable.

La soluci3n del problema de la estabilidad en los -- sistemas el3ctricos de potencia se reduce a determinar si la potencia el3ctrica m3xima que es transferida de una m3quina o grupos de m3quinas a otra m3quina o grupos de m3quinas, es o no mayor que la potencia mec3nica m3xima, que puede ser suministrada o tomada de sus flechas. A este valor m3ximo de potencia transferida que ocurre sin p3rdidas de sincronismo - se le llama Lmite de Estabilidad.

Para facilitar el an3lisis del problema de la estabilidad 3ste se ha dividido en tres grupos que son:

- A) HUNTING.- Son oscilaciones sostenidas o permanentes entre m3quinas que no alcanzan a perjudicar - el sistema.
- B) ESTABILIDAD EN ESTADO ESTABLE.- La estabilidad en estado estable de un sistema es la estabilidad -- del sistema bajo variaciones graduales o relativamente lentas; tales como cambios de carga.
- C) ESTABILIDAD EN ESTADO TRANSITORIO.- La estabilidad en estado transitorio se refiere a la estabi-

lidad del sistema durante cambios repentinos tales como cortos circuitos, cambios bruscos de carga o alteraciones importantes en su configuraciones eléctricas.

FACTORES QUE AFECTAN A LA ESTABILIDAD

Existen siete factores esenciales que afectan la estabilidad de un sistema. Dichos factores son de dos tipos, mecánicos y eléctricos.

Entre los factores mecánicos se encuentran:

- 1.- Par de entrada del primotor.
- 2.- Inercia del primotor y del generador.
- 3.- Inercia de la carga.
- 4.- Par de salida de la carga.

Entre los factores eléctricos se encuentran:

- 5.- Voltaje interno del generador síncrono (Eq)
- 6.- Reactancia del sistema incluyendo:
 - a) Generador
 - b) Línea
 - c) Motor
- 7.- Voltaje interno del motor síncrono (carga).
(Es)

LIMITE DE ESTABILIDAD EN REGIMEN PERMANENTE DE LA MAQUINA SINCRONA

Se define el límite de estabilidad en régimen permanente al máximo flujo posible de energía que puede

pasar por un punto determinado sin que exista pérdida de estabilidad cuando se aumente la energía muy gradualmente.

El criterio del límite de estabilidad en régimen permanente puede ser mostrado a base del desempeño de las curvas de excitación de la máquina síncrona.

Para nuestro análisis consideraremos a la máquina -- síncrona conectada directamente a un bus infinito. El desempeño de dicha máquina conectada a un bus infinito es un poco diferente al desempeño de un generador simple trabajando a su propia carga, en este caso decimos que la alteración de la excitación no puede alterar el voltaje terminal sin embargo se afecta el factor de potencia. La potencia desarrollada por un generador depende solamente de la potencia mecánica suministrada por la turbina, además es conveniente hacer notar que la excitación no controla la potencia si no el factor de potencia.

LIMITE DE ESTABILIDAD PRACTICO PARA FACTORES DE POTENCIA ADELANTADO.

A) - PARA MAQUINAS SINCRONAS DE ROTOR CILINDRICO.- el límite teórico de la estabilidad para una máquina -- síncrona de rotor cilíndrico es analizado de acuerdo a su diagrama fasorial de corrientes y tensiones.

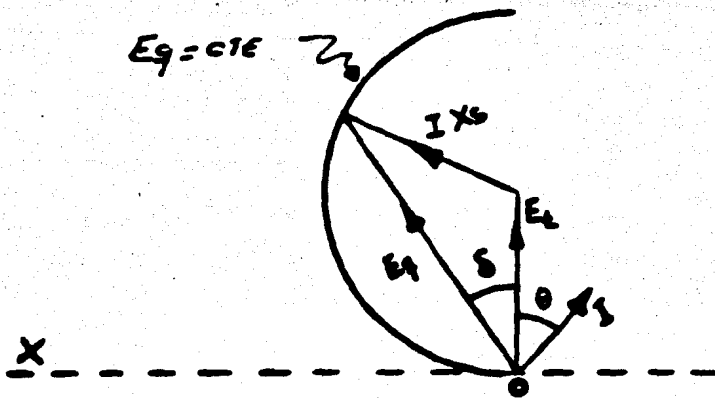


Fig. II-1 Diagrama fasorial de corrientes y tensiones para un generador síncrono de rotor cilíndrico.

Donde: δ = ángulo de potencia
 θ = ángulo de factor de potencia

En dicho diagrama podemos darnos cuenta que si la excitación permanece constante, entonces la posición de E_g describe un círculo con centro donde termina el vector E_t , también de dicha figura podemos notar que cuando nuestro ángulo de potencia obtenga el valor de $\pi/2$ en ese instante se tendrá el límite teórico de estabilidad y que en nuestra figura se encuentra representado por la horizontal OX.

Esta línea representa una condición de inestabilidad donde el menor incremento en la carga trae consigo la pérdida de sincronismo de nuestra máquina.

En la práctica es imposible operar en el límite de estabilidad teórico por lo que debe tomarse un margen entre los límites de operación práctico y teórico. El

método usual es tomar un margen del 10% de la potencia de salida en MW con una excitación constante.

Representando los círculos de excitación constante - sobre nuestro diagrama circular, tenemos que el procedimiento empieza construyendo dichos círculos de excitación constante con centro en A para los diferentes valores de excitación.

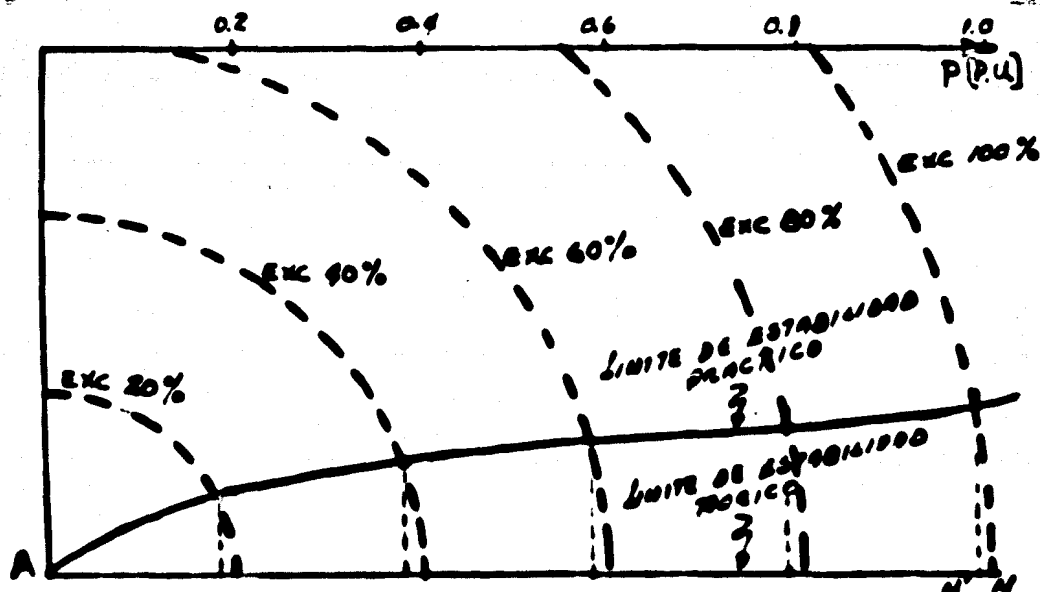


Fig. II-2. Límite de estabilidad práctico para una máquina síncrona de rotor cilíndrico.

Posteriormente se reduce el segmento "AN" hasta un valor de "AN'" o sea a un 10% y en el punto anterior se traza una vertical hasta cortar con el círculo de excitación del 100%, análogamente se hace lo mismo para los diferentes círculos, de excitación, -

teniendo como resultado una serie de puntos que al unirlos nos dará la curva del límite de estabilidad práctico buscada.

B) PARA MAQUINAS SINCRONAS DE ROTOR DE POLOS SALIENTES.- En el caso de una máquina síncrona de rotor de polos salientes la localización de la excitación constante no son círculos si no familias de curvas que llevan por nombre curvas de Limacons, las cuales vienen representadas por la siguiente ecuación.

$$r = a \cos \delta + b$$

donde:

$$a = E_t \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)$$

$$b = \frac{E_t}{X_d}$$

Estas curvas de Limacons toman la siguiente forma en nuestro diagrama circular, conviene hacer notar que para el trazo de las curvas de Limacons en el diagrama circular su construcción será en una forma aproximada ya que su exactitud analítica es un poco más compleja.

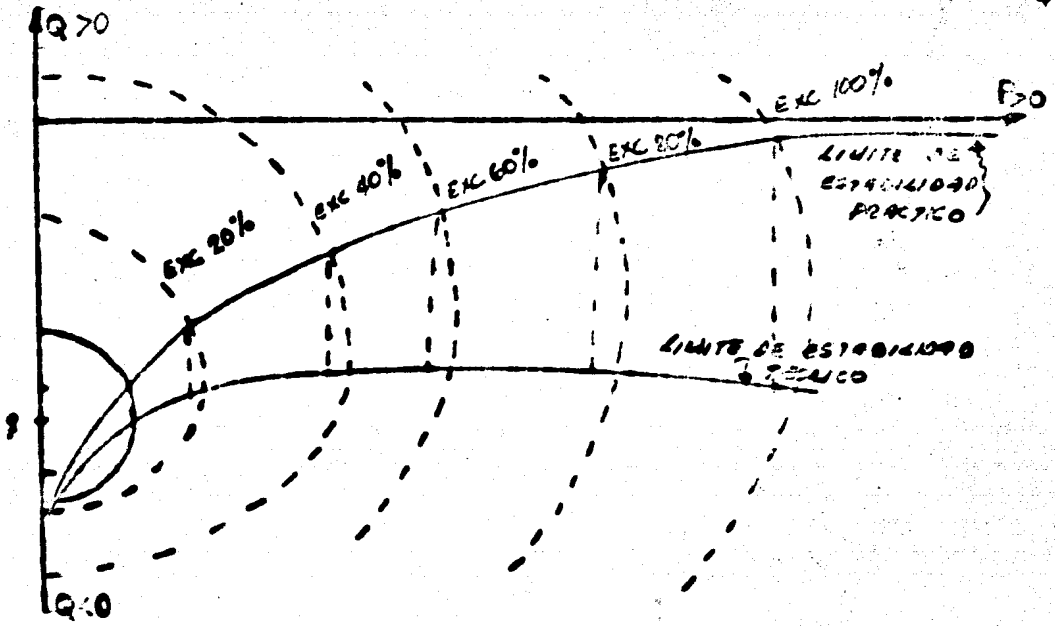


Fig. II-3 Limite de estabilidad práctico para un generador sincrónico de rotor de polos salientes.

Para una excitación constante, se encuentra la posición adecuada trazando radios desde q , como se muestra en la figura y marcando sobre cada uno, una longitud constante, la posición de la excitación como se dijo anteriormente no son círculos si no curvas llamadas Limacons, la forma de estas curvas se hace mas notoria para excitaciones pequeñas, cada posición tendrá un punto que corresponderá a una máxima potencia; la curva a través de estos puntos constituirán el limite teórico de estabilidad, y la línea de estabilidad práctica se construye aplicando el mismo método que se empleó en la máquina sincrónica de

rotor cilíndrico.

DIFERENCIA ENTRE LIMITE DE ESTABILIDAD Y LIMITE DE - POTENCIA.

Cuando opera un generador síncrono es necesario distinguir entre lo que es llamado límite de potencia - (capabilidad) y límite de estabilidad.

Un límite de potencia es cuando se excede este para cualquier tiempo apreciable y puede causar daño al sistema, como por ejemplo daño al aislante debido a la elevación de la temperatura, al menos que el límite de potencia no sea rebasado por mucho tiempo, la máquina puede continuar operando.

Un límite de estabilidad será cuando se exceda este por cortos intervalos de tiempos y ocasionará la pérdida de sincronismo bajo esta condición habrá una gran elevación de potencia, actuando el dispositivo de protección para desconectar la máquina del sistema.

ESTABILIDAD EN REGIMEN TRANSITORIO.

La estabilidad de cualquier Sistema Eléctrico de Potencia en régimen transitorio lleva consigo la consideración de algunas de las propiedades mecánicas de las máquinas del sistema, ya que después de una perturbación cualquiera, las máquinas tienen que ajustar los ángulos relativos de sus rotores para cumplir la igualdad de transferencia de potencia (Pot.

mecánica = Pot. eléctrica).

Como el problema de la estabilidad es tan mecánico - como eléctrico es por este motivo que tendremos que estudiar primero algunos principios mecánicos.

La magnitud de un PAR viene definida por el producto que resulta de multiplicar su fuerza por la distancia perpendicular entre ellas.

$$G = F R \text{ (Kg}_f \text{ - M}_r \text{)}$$

En su forma mecánica más simple, el trabajo se define como el producto que resulta de multiplicar su fuerza por la distancia a través de la cual actúa la fuerza.

$$T = F R \text{ COS } \theta \text{ (Kg}_f \text{ - M)}$$

La diferencia que existe entre las unidades del par y del trabajo se refiere a la longitud "R". Ya que la longitud "R" del par es en el sentido de un ángulo recto, mientras que la longitud "R" del trabajo es en el sentido de la fuerza.

Las relaciones que rigen a los sistemas de rotación son aplicables a la solución de los problemas de estabilidad en régimen transitorio, debido a este motivo partiremos de la energía cinética de un cuerpo en movimiento en rotación para determinar la constante de inercia.

$$E = \frac{1}{2} JW^2 \text{ (Kg}_f \text{ - M) -----(II-1)}$$

donde:

J = momento de inercia.

W = velocidad angular

El momento de inercia J puede ser expresado como:

$$J = \frac{WK^2}{g} \text{ (Kg}_f \text{ Mr}^2 \text{ M}^{-1} \text{ SEG}^2 \text{) -----(II-2)}$$

donde:

WK^2 = peso de las partes giratorias de la máquina multiplicada por el cuadrado del radio de giro.

Los mismo podemos hacer para la velocidad angular

$$W = \frac{2\pi N}{60} \text{ (rad/seg)}$$

$$\text{rad} = \frac{M}{M_r}$$

sustituyendo el término radian por su equivalente en la ecuación de la velocidad angular.

$$W = \frac{2\pi N}{60} \text{ (M M}_r \text{ }^{-1} \text{ SEG}^{-1} \text{)}$$

por lo que:

$$W^2 = \left(\frac{277' N}{60} \right)^2 (M^2 M_R^{-2} \text{SEG}^{-2}) \text{----- (II-3)}$$

sustituyendo las ecuaciones (II-2) y (II-3) en (II-1)

$$E = \frac{1WK^2}{2g} \left(\frac{277' N}{60} \right)^2 (Kg_f M_R^2 M^{-1} \text{SEG}^2 M^2 M_R^{-2} \text{SEG}^{-2})$$

$$E = \frac{1WK^2}{2g} \left(\frac{277' N}{60} \right)^2 (Kg_f - M) \text{----- (II-3')}$$

Si a nuestra ecuación de la energía la multiplicamos por la unidad dicha ecuación no se altera, valiéndose de este artificio matemático obtendremos el valor de la energía en función de los MW-SEG.

$$1 \text{ H.P.} = 75 \frac{Kg_f M}{\text{SEG}} = 735.499 \times 10^{-6} \text{ (M.W.)}$$

$$1 = \frac{735.499 \times 10^{-6} \text{ MW}}{75 \frac{Kg_f M}{\text{SEG}}} \text{----- (II-4)}$$

sustituyendo la ecuación (II-4) en (II-3') obtendremos la ecuación de la energía en las unidades buscadas.

$$E = \frac{1WK^2}{2g} \left(\frac{277' N}{60} \right)^2 \frac{735.499 \times 10^{-6}}{75} (Kg_f - M) \times$$

$$\times \left(\frac{\text{MW}}{\frac{Kg_f - M}{\text{SEG}}} \right)$$

$$E = \frac{4\pi^2 \times 735.499 \times 10^{-6} \text{ WK}^2 \text{ N}_B^2}{2 \times 9.81 \times 3600 \times 75} \quad (\text{MW} - \text{SEG})$$

$$E = 5.481 \times 10^{-9} \text{ WK}^2 \text{ N}_B^2 \quad (\text{MW} - \text{SEG}) \quad \text{----- (II-5)}$$

Una vez obtenido el valor de la energía pasaremos a definir la constante de inercia "H"; la constante de inercia H viene definida por la siguiente relación.

$$H = \frac{E \text{ (energía acumulada)}}{S_B \text{ (potencia base)}} \quad \text{----- (II-6)}$$

sustituyendo la ecuación (II-5) en (II-6) obtenemos el valor de la constante de inercia H.

$$H = \frac{5.481 \times 10^{-9} \text{ WK}^2 \text{ N}_B^2}{S_B} \quad (\text{SEG})$$

La constante de inercia H se define como la energía acumulada que obtiene el sistema cuando se adquiere la velocidad nominal. Existe otro término denominado también constante de inercia (M) el cuál lo definiremos a partir de la ecuación de la energía.

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (\text{Kg}_f \cdot \text{M})$$

$$J = \frac{2 E}{\omega^2} \quad \text{----- (II-7)}$$

además conocemos que:

$$J = \frac{M}{W} \text{-----} \text{(II-8)}$$

donde:

M = constante de inercia

W = velocidad angular.

igualando (II-7) y (II-8)

$$\frac{2 E}{W^2} = \frac{M}{W}$$

$$M = \frac{2 E W}{W^2}$$

$$M = \frac{2 E}{W} \left(\frac{\text{MJ/seg}}{\text{rad}} \right) \text{-----} \text{(II-9)}$$

Cuando M se calcula a partir de JW con el valor W de la velocidad sincrónica de la máquina, se le denomina constante de inercia. O sea el momento angular cinético M de una máquina no es constante puesto que la velocidad angular varía, sin embargo podemos considerarla como constante ya que la velocidad de la máquina no difiere mucho de la velocidad de sincronismo - a menos que se sobrepase el límite de estabilidad.

Más adelante veremos como M depende de H y la relación que existe entre ambas.

A continuación haremos un análisis para encontrar la

ecuación que nos define el par de aceleración (en p. u.) en función de la constante de inercia "H".

Para encontrar dicha expresión partiremos de la ecuación del par de aceleración en función de los $\text{Kg}_f \cdot \text{M}$

$$T_A = J \alpha_{\text{MEC}} (\text{Kg}_f \cdot \text{M}) \text{-----}(\text{II-10})$$

Donde:

T_A = par de aceleración

J = momento de inercia

α_{MEC} = aceleración mecánica.

Valiéndonos de las igualdades que existen entre las velocidades, angulares, mecánicas y eléctricas encontraremos un T_A en función del ángulo de potencia δ

$$p = \frac{\theta \text{ eléctricos}}{\theta \text{ mecánicos}} = \frac{W_e}{W_m} = \frac{\alpha_e}{\alpha_m} = \frac{60f (\text{rad. elec.})}{N (\text{rad. mec.})} \dots$$

----- (II-11)

ya que:

$$W_e = 2\pi f \left(\frac{\text{rad}_e}{\text{seg}} \right) ; W_m = \frac{2\pi N}{60} \left(\frac{\text{rad}_m}{\text{seg}} \right)$$

por lo tanto

$$\frac{W_e}{W_m} = p = \frac{2\pi f}{\frac{2\pi N}{60}} = \frac{2\pi f \times 60}{2\pi N} = \frac{60f}{N} \left(\frac{\text{rad. elec.}}{\text{rad. mec.}} \right)$$

como :

$$\frac{W_e}{W_m} = \frac{\alpha_E}{\alpha_M}$$

podemos decir que:

$$\frac{\alpha_E}{\alpha_M} = \frac{60f}{N}$$

$$\alpha_M = \frac{\alpha_E \cdot N}{60f} \left(\frac{\text{rad}}{\text{seg}^2} \right) = \frac{\alpha_E \cdot N}{60f} \left(M M_T^{-1} \text{SEG}^{-2} \right)$$

donde α_E la podemos representar como la segunda derivada del ángulo de potencia δ quedándonos la α_M de la siguiente manera:

$$\alpha_M = \frac{N \delta''}{60f} \left(\frac{\text{rad}}{\text{seg}^2} \right) \text{----- (II-12)}$$

Además el momento de inercia J en función de los parámetros toma la siguiente manera

$$J = \frac{WK^2}{g} \left(\text{Kgf M}^{-1} \text{seg}^2 M_T^2 \right)$$

sustituyendo los valores de α_M y J en función de la ecuación del par de aceleración nos queda.

$$T_A = \frac{WK^2}{g} \frac{N \delta''}{60f} \left(\text{Kgf M}^{-1} \text{seg}^2 M_T^2 M M_T^{-1} \text{seg}^{-2} \right)$$

$$G_A = \frac{WK^2 N_0 P^2 \delta}{60fg} \quad (\text{Kgf-M}_r)$$

como:

$$\text{rad} = \frac{M}{M_r} = M M_r^{-1}$$

por lo tanto tenemos que:

$$M_r = \frac{M}{\text{rad}} = M \text{rad}^{-1}$$

introduciendo este término en las unidades del par de aceleración G_A nos queda lo siguiente :

$$G_A = \frac{WK^2 N_0 P^2 \delta}{60gf} \quad (\text{Kgf M rad}^{-1}) \quad \text{----- (II-13)}$$

Una vez encontrado el G_A encontraremos nuevamente otro par de aceleración, solamente que en esta ocasión será un par base para que al hacer la división de $\frac{G_A}{G_B}$ obtengamos el par de aceleración en p.u.

un par base queda definido de la siguiente relación:

$$G_B = \frac{P_b}{W_b} = \left(\frac{\text{MW} \cdot \text{SEG}}{\text{rad}} \right)$$

donde:

$$G_B = \text{par base dado en } \left(\frac{\text{MW} \cdot \text{SEG.}}{\text{rad}} \right)$$

P_B = potencia base en MW

ω_B = velocidad angular en rad/seg.

Como nos podemos dar cuenta las unidades del τ_B -- son diferentes a las de τ_A por este motivo que tendremos que buscar un factor que al multiplicarlo por las unidades del τ_B nos de las unidades similares al τ_A ; dicho factor corresponde al empleado -- anteriormente, que es:

$$1 = \frac{75 \text{ Kgf} \cdot \text{M/seg}}{735.499 \times 10^{-6} \text{ MW}}$$

Multiplicando este factor por el τ_B nos queda:

$$\tau_B = \frac{60 P_B \text{ MW SEG}}{2\pi N_B \text{ rad}} \times \frac{75 \text{ Kgf M/SEG}}{735.499 \times 10^{-6} \text{ MW}}$$

$$\tau_B = \frac{974249}{N_B} \text{ (Kgf M rad}^{-1}\text{)} \text{ -----(II-14)}$$

como ya tenemos el τ_A y el τ_B en unidades iguales, procederemos a encontrar el par de aceleración

T_A en p.u.

$$T_A = \frac{\frac{W K^2 N_B^2 \rho^2 \delta}{60 g f}}{974249} \left(\frac{\text{Kgf M rad}^{-1}}{\text{Kgf M rad}^{-1}} \right)$$

$$T_A = \frac{N_B}{974249}$$

Ya que:

$$T_A = \frac{G_A}{G_B} \quad (\text{p. u.})$$

tomando g el valor de 9.81 m/seg^2 nos queda:

$$T_A = \frac{W K^2 N_B^2 \rho^2 \delta}{573247131.6 f P_B} \quad (\text{p.u.}) \dots \dots \dots (\text{II-15})$$

finalmente el T_A buscado toma la siguiente forma

$$T_A = \frac{W K^2 N_B^2 \rho^2 \delta}{f \pi S_B} \frac{5.481 \times 10^{-9}}{\pi} \quad (\text{p. u.})$$

Y, recordando que la constante de inercia es:

$$H = \frac{E}{S_B} = \frac{W K^2 N_B^2 5.481 \times 10^{-9}}{S_B} \quad (\text{seg})$$

podemos representar el T_A en función de la constante de inercia "H".

$$T_A = \frac{H \rho^2 \delta}{\pi f} \quad (\text{p. u.})$$

ahora si tenemos que:

$$\gamma = \omega_e t \quad (\text{rad}_e)$$

$$\gamma = 2\pi f t \quad (\text{rad}_e)$$

despejando t de la ecuación anterior

$$t = \frac{\gamma}{2\pi f} \quad (\text{seg})$$

sustituyendo t en T_A se tiene:

$$T_A = \frac{H}{\pi E} \frac{d^2 \delta}{d\zeta^2} = \frac{H}{\pi E} \frac{d^2 \delta}{d \left(\frac{\gamma}{2\pi f} \right)^2} \quad (\text{p.u.})$$

$$T_A = \frac{H}{\pi E} \frac{d^2 \delta}{\frac{d\gamma^2}{W^2}} = \frac{H W^2}{\pi E} \frac{d^2 \delta}{d\gamma^2} = \frac{H (2\pi f)^2}{\pi E} \frac{d^2 \delta}{d\gamma^2}$$

$$T_A = \frac{4\pi^2 f^2 H}{\pi E} \frac{d^2 \delta}{d\gamma^2} = \frac{4\pi f H}{E} \frac{d^2 \delta}{d\gamma^2}$$

Llamando M al valor:

$$M = 4\pi f H$$

donde M y H son las constantes de inercia encontradas anteriormente.

Sustituyendo el valor de M en la expresión anterior nos queda que:

$$T_A = M \frac{d^2 \delta}{dT^2} \text{ (p.u.)} \text{ ----- (II-16)}$$

sustituyendo el valor de T

$$T_A = 4\pi f H \frac{d^2 \delta}{d(wt)^2} = \frac{4\pi f H}{w} \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

$$T_A = \frac{4\pi f H}{2\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = 2H \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

$$T_A = 2H \frac{d^2 \delta}{dt^2} \text{ (p.u.)}$$

o, también

$$T_A = 2H \frac{d}{dt} p\delta \text{ (p.u.)} \text{ ----- (II-17)}$$

Analizando la ecuación anterior podemos interpretar mejor la cte. de inercia "H".

$$T_A = 2H \frac{d}{dt} p\delta$$

además si:

$$\frac{d}{dt} p\delta = \frac{\Delta W}{\Delta t} \text{ ----- (II-18)}$$

Y sustituyendo en la ecuación del T_A Tendremos

$$T_A = 2 H \frac{\Delta W}{\Delta t} \text{ ----- (II-19)}$$

$$\Delta t = 2 H \frac{\Delta W}{T_A}$$

suponiendo que:

$$T_A = 1 \text{ p.u.} \quad \gamma \quad \Delta W = \frac{1}{2}$$

tendremos como resultado:

$$\Delta t = 2 (1) H \left(\frac{1}{2}\right) = H \text{ (seg)}$$

$$t = H = \text{seg.} \text{ ----- (II-20)}$$

La constante de inercia la podemos interpretar como el tiempo en segundos que requiere la unidad o grupo rígido coherente de unidades para que la velocidad cambie 0.5 p.u. bajo la acción constante de un par de valor $T = 1 \text{ p.u.}$

ECUACION DE LA OSCILACION.

El comportamiento de una máquina síncrona durante regímenes transitorios está descrito por la ecuación .

de oscilación; es debido a este motivo que encontraremos dicha ecuación basándonos en el siguiente diagrama.

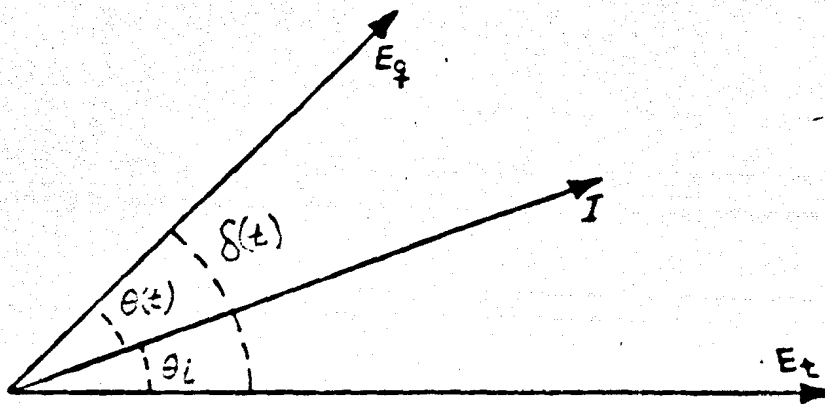


Fig. II-4

de nuestro diagrama podemos ver que :

$$\delta(t) = \theta(t) - \theta_i$$

además sabemos que la velocidad de sincronismo es:

$$W_s = \frac{d\theta}{dt} \quad \text{por lo tanto; } d\theta = W_s dt$$

integrando ambos miembros nos queda:

$$\int_0^{\lambda} d\theta = \int_c^i W_s dt = W_s \int_c^i dt$$

$$\theta_i = W_s t$$

sustituyendo Θ en $\delta(t)$ tendremos

$$\delta(t) = \Theta(t) + W_s t$$

Derivando ambos miembros con respecto a t se tiene:

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \frac{d\Theta}{dt} + \frac{dW_s t}{dt}$$

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \frac{d\Theta}{dt} + W_s$$

sacando la segunda derivada nos queda

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2\Theta}{dt^2} = \alpha = \text{aceleración}$$

sustituyendo el valor de $\alpha = \frac{T_A}{J}$

$$\frac{T_A}{J} = \frac{d^2\delta}{dt^2}$$

finalmente la ecuación de oscilación buscada será:

$$T_A = J \frac{d^2\delta}{dt^2} \text{ ----- (II-21)}$$

La curva obtenida se llama curva de oscilación. Si dicha curva de oscilación indica que el ángulo de potencia δ empieza a disminuir después de pasar

por un máximo, se supone, normalmente que el sistema no perderá la estabilidad y, que las oscilaciones de δ alrededor del equilibrio se harán cada vez pequeñas hasta desaparecer por completo.

A continuación, haremos un pequeño análisis de la ecuación dinámica de la potencia en estado transitorio.

ECUACION DINAMICA DE LA POTENCIA.

Sabemos que la ecuación de la potencia es:

$$P = TW$$

para un $t = t_0$

$$P_0 = T_0 W_0$$

donde:

W_0 = velocidad en estado estable ó velocidad

de sincronismo

Para un $t = t$

$$P_t = T_t W_t = P_0 + \Delta P = (T_0 + \Delta T)(W_0 + \Delta W)$$

$$P_t = T_0 W_0 + T_0 \Delta W + \Delta T W_0 + \Delta T \Delta W$$

considerando que la variación es pequeña podemos despreciar el último término de la ecuación anterior.

$$P_t = T_0 W_0 + T_0 \Delta W + \Delta T W_0$$

como:

$$P_0 = T_0 W_0$$

$$P_t = P_0 + T_0 \Delta W + \Delta T W_0$$

$$P_t - P_0 = T_0 \Delta W + \Delta T W_0$$

dividiendo esta expresión entre W_0 nos queda:

$$\frac{P_t - P_0}{W_0} = \frac{\Delta P}{W_0} = \frac{T_0 \Delta W}{W_0} + \frac{\Delta T W_0}{W_0}$$

$$\frac{\Delta P}{W_0} = T_0 \frac{\Delta W}{W_0} + \Delta T$$

Si consideramos a la velocidad sincrona (W_0) Igual a 1 p.u. nos queda:

$$\Delta P = T_0 \Delta W + \Delta T$$

además sabemos que:

$$\Delta W = P \delta$$

por lo que finalmente nuestra ecuación dinámica de la potencia queda:

$$\Delta P = \Delta T + T_0 P \delta \quad \text{----- (II-22)}$$

esta ecuación dinámica de la potencia es también -- aplicada a los sistemas mecánicos y eléctricos, para un sistema mecánico toma la siguiente forma:

$$\Delta P_M = \Delta T_M + T_{M0} P \delta_M \quad \text{----- (II-23)}$$

por lo consiguiente para un sistema eléctrico quedaría.

$$\Delta P_E = \Delta T_E + T_{E0} P \delta_E \quad \text{----- (II-24)}$$

En un generador síncrono, el par mecánico es producido por el primotor, mientras que el par eléctrico es producido por la carga. Si no se considera el par -- originado por rozamiento del aire y por pérdidas en el núcleo cualquier diferencia entre el par mecánico y el par eléctrico debe dar lugar a una aceleración o desaceleración de la máquina.

Si el ΔT_M representa al par mecánico y ΔT_E al par eléctrico el par que originará la aceleración es:

$$\Delta T_M - \Delta T_E = T_A \text{ ----- (II-25)}$$

también en función de (s), tendremos que:

$$\Delta T_M (s) - \Delta T_E (s) = J s^2 \delta = J s \Delta W (s) = J s \rho \delta (s)$$

$$\rho \delta (s) = \frac{\Delta T_M (s) - \Delta T_E (s)}{J s} \text{ ----- (II-26)}$$

además sabemos que:

$$J = \frac{M}{W}$$

Sustituyendo J en la ecuación (II-26)

$$\rho \delta (s) = \frac{\Delta T_M (s) W - \Delta T_E (s) W}{M s}$$

como:

$$P = TW$$

finalmente tendremos que la velocidad de sincronismo

es:

$$\rho \delta (s) = \frac{\Delta P_M (s) - \Delta P_E (s)}{M s} \text{ ----- (II-27)}$$

AMORTIGUAMIENTO PROPIO DE UN SISTEMA ELECTRICO

Si partimos de un estado de equilibrio en que el par motor es igual al par generador y al que corresponde un valor determinado y constante, de la frecuencia - por lo tanto se produce un cambio de la potencia consumida y si la posición de las válvulas de admisión de agua o de vapor de las turbinas no se modifica, - la frecuencia del sistema variará.

En general se llegará a un nuevo estado de equili---brio a una frecuencia distinta de la inicial, en ---efecto, en la mayor parte de los casos un aumento de frecuencia, produce un aumento del par resistente de la carga y una disminución del par motor de las turbinas; una disminución de la frecuencia produce el - efecto contrario.

En la figura (II-5) observamos el efecto que causa - la variación de la carga sobre la frecuencia de un - sistema.

En los sistemas eléctricos de potencia existen dos - casos de potencias.

- 1).- Cuando la potencia es función de la frecuencia; es decir $P_g = f(F)$; por lo tanto cuando ΔF es mayor que cero entonces:

ΔP_g es mayor que cero

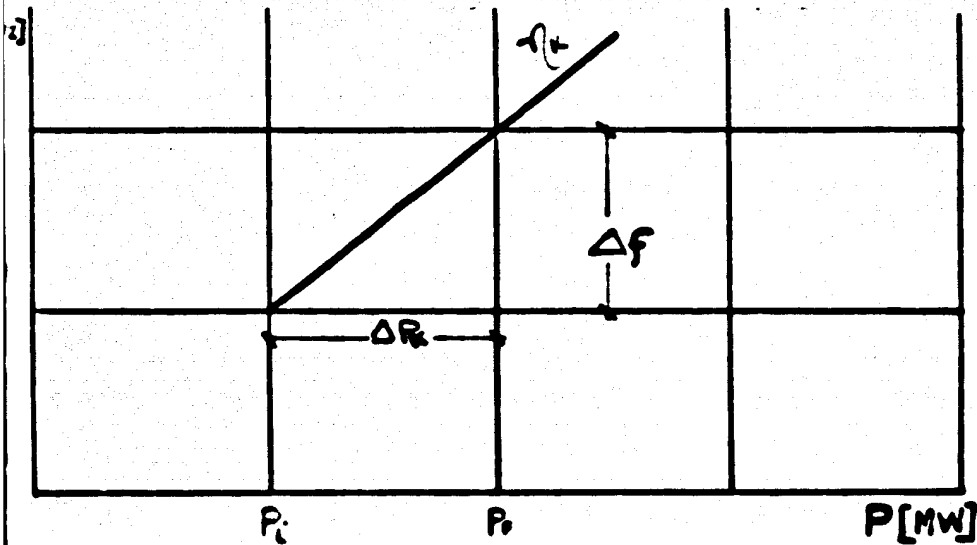


Fig. II-5

2).- Cuando la potencia no es función de la frecuencia (carga resistiva), esto es:

$$P_E \neq f(F) \text{ por lo tanto } F = 0, \quad P = 0.$$

Para nuestro estudio analizaremos el primer inciso solamente. De la gráfica (II-5).

$$P_f = P_i + \Delta P_k \text{(II-28)}$$

por definición la característica de la carga (η_k) es:

$$\eta_k = \frac{\Delta P_k}{\Delta f} \text{(II-29)}$$

sustituyendo (II-29) en (II-28)

$$P_f = P_i + \eta_k \Delta f \text{(II-30)}$$

Haciendo:

$$f_i = f_n = \text{Frecuencia nominal}$$

$$P_i = P/n = \text{potencia nominal.}$$

pasando la ecuación (II-30) en p.u.

$$\Delta P = \frac{\Delta P_k}{p/n} \quad \text{por lo tanto} \quad P_k = \Delta P p/n$$

$$\Delta F = \frac{\Delta f_n}{f_n} \quad \Delta f_n = \Delta F f_n$$

sustituyendo en la ecuación (II-29)

$$N_k = \frac{\Delta P_k}{\Delta f_n} = \frac{\Delta P p/n}{\Delta F f_n} \quad (\text{p.u.}) \quad \text{----- (II-31)}$$

Por lo tanto sustituyendo la última ecuación en la ec. (II-30) nos queda:

$$P_f = p/n + \frac{\Delta P p/n}{\Delta F f_n} \Delta f$$

donde:

$$N_k = \frac{\Delta P}{\Delta F} \quad \text{Y} \quad \frac{\Delta f}{f_n} = \Delta F$$

$$P_f = p/n + N_k p/n \Delta F \quad (\text{p.u.})$$

$$P_f = p/n (1 + N_k \Delta F) \quad (\text{p.u.})$$

como: $\Delta F = P\delta$

$$P_f = p/n (1 + N_k P\delta) \quad (\text{p.u.}) \text{ ----- (II-32)}$$

Siendo N_k la amortiguación del sistema

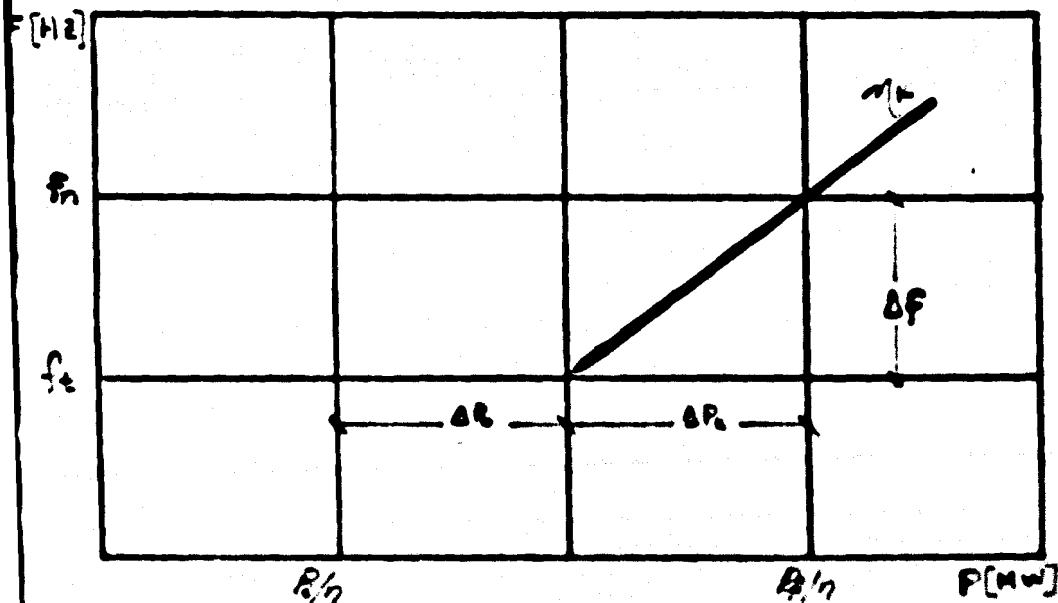


Fig. II-6

de la figura (II-6) tenemos que:

$$P_f = P_i + \Delta P_G + \Delta P_k \text{ -----(II-33)}$$

sustituyendo (II-29) en (II-32) nos queda:

$$P_f = P_i + \Delta P_G + \Delta f \eta_k \text{ (MW) -----(II-34)}$$

sabiendo por la ecuación (II-31)

$$\eta_k = \frac{N_k P_i}{f_n}$$

sustituyéndola en la ecuación (II-34).

$$P_f = P_i + \Delta P_G + \frac{\Delta f N_k P_i}{f_n} \text{ (MW)}$$

$$P_f = P_i + \Delta P_G + N_k P_i \Delta F \text{ (MW)}$$

dividiendo la última expresión entre P_B para tenerla en p.u.

$$P_f = P_i + \Delta P_G + N_k \Delta F P_i \text{ (p.u.)}$$

COMO:

$$\Delta F = \frac{\Delta P_D}{P_B} ; P_f - P_i = \Delta P_E \quad Y \quad N_k P_i = D$$

por lo tanto: Si $P_i = 1$ p.u.

$$\Delta P_E = \Delta P_G + D p \delta \quad (\text{p.u.}) \quad \text{-----} \quad (\text{II-35})$$

La ecuación (II-35) es la ecuación que nos determina el ΔP_E en función del ΔP_G , de la velocidad de sincronismo y del coeficiente de amortiguamiento D.

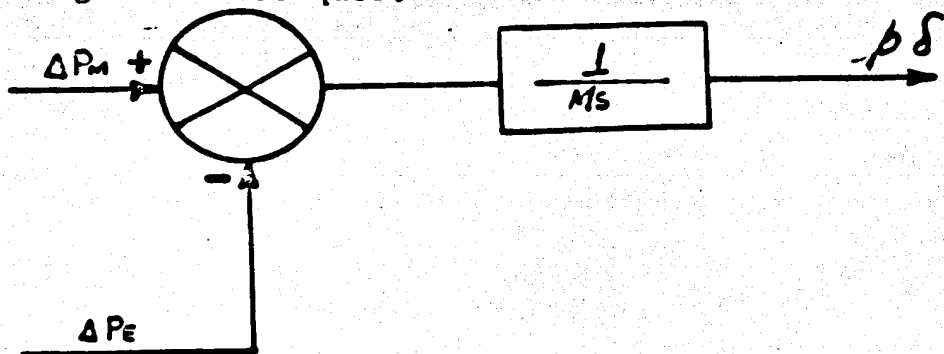
El coeficiente de amortiguamiento D del sistema es el que caracteriza la ley de variación de la carga eléctrica en función de la frecuencia, y además nos representa la posibilidad inherente al sistema de alcanzar un nuevo estado de equilibrio como ya se dijo anteriormente, mencionaremos que según la naturaleza de la carga y el tipo de las turbinas el valor del coeficiente D puede variar considerablemente. Por ejemplo si la carga eléctrica conectada es insensible al cambio de frecuencia, el coeficiente D será igual a cero.

En un sistema eléctrico grande, el valor del coeficiente de amortiguamiento puede tener valores bajos y en tal caso las variaciones de frecuencia del sistema debidas a las variaciones inevitables de la carga pueden ser de una amplitud inadmisibles.

Recordando la ecuación (II-27)

$$\Delta P_{ii} - \Delta P_E = M_s p \delta \quad (\text{p. u.})$$

En la cual podemos representar mediante el sig. diagrama de bloques.



sustituyendo la ecuación (II-35) en (II-27) nos queda:

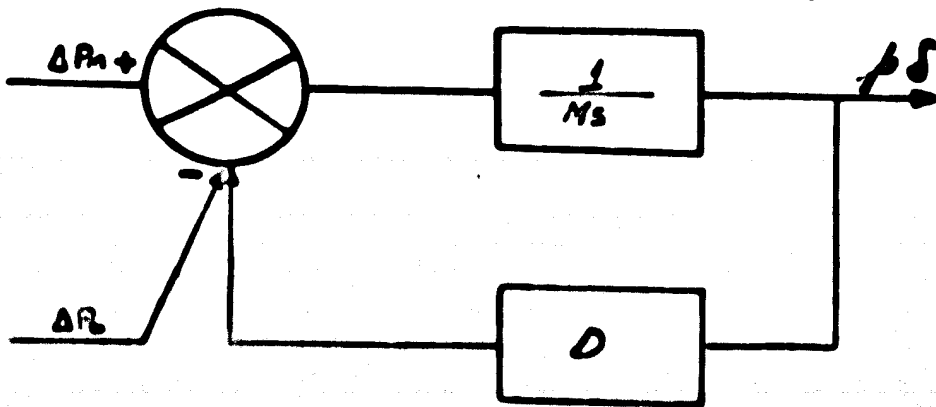
$$\Delta P_M - \Delta P_G - D p\delta = M_s p\delta$$

$$\Delta P_M - \Delta P_G = M_s p\delta + D p\delta$$

$$\Delta P_M - \Delta P_G = p\delta (M_s + D)$$

$$p\delta = \frac{\Delta P_M - \Delta P_G}{M_s + D} \text{ (II-36)}$$

Esta ecuación en diagrama de bloques nos quedaría:



Si consideramos que $\Delta P_M = 0$, o sea que no se modifique la posición del cambiador de velocidad del regulador de la turbina.

La ecuación (II-36) nos queda:

$$p\delta(s) = - \frac{\Delta P_G}{s(Ms + D)} \text{ ----- (II-37)}$$

si resolvemos la ecuación (II-37) utilizando transformada de Laplace nos queda:

$$p\delta(s) = \frac{K_1}{s} + \frac{K_2}{Ms + D}$$

desarrollando por fracciones parciales tenemos:

$$K_1 = \frac{-\Delta P_G}{D} \quad K_2 = \frac{\Delta P_G M}{D}$$

por lo tanto.

$$p\delta(s) = \frac{\Delta P_G}{D} \left[-\frac{1}{s} + \frac{1}{s + D/M} \right]$$

sacando la antitransformada se tiene:

$$p\delta(s) = \frac{\Delta P_G}{D} \left(1 - e^{-t/\frac{M}{D}} \right) \text{ ----- (II-38)}$$

donde:

$\frac{M}{D} = \tau$, se llama la constante de tiempo, es

decir, es el tiempo que tarda en amortiguarse el sistema, como se observa en la siguiente figura:

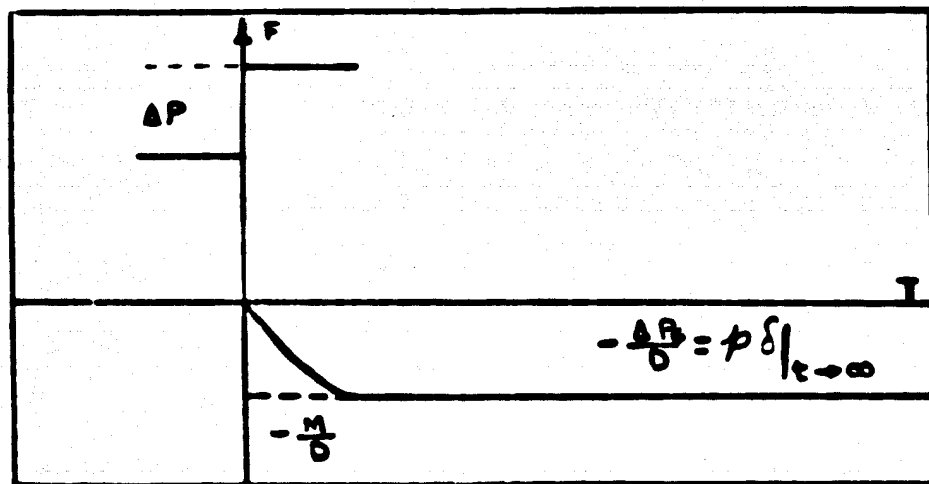


Fig. II-7

A continuación se ilustrará con un ejemplo para la determinación de D .

EJEMPLO:

Si repentinamente una de las unidades generadoras de 150 MW, la sacamos de servicio.

Existirá un aumento de ΔP_G en 150 MW y como $P_M =$ cte. por tanto $\Delta P_M = 0$, ya que la posición de las válvulas de admisión de agua o de vapor no se modificará, por lo tanto la frecuencia del sistema variará

hasta llegar a un nuevo estado de equilibrio. Si :

$$D = \frac{\Delta P_G}{\Delta f} = \frac{150}{0.5} = 300$$

$$D = 300 \frac{\text{MW}}{\text{Hz}}$$

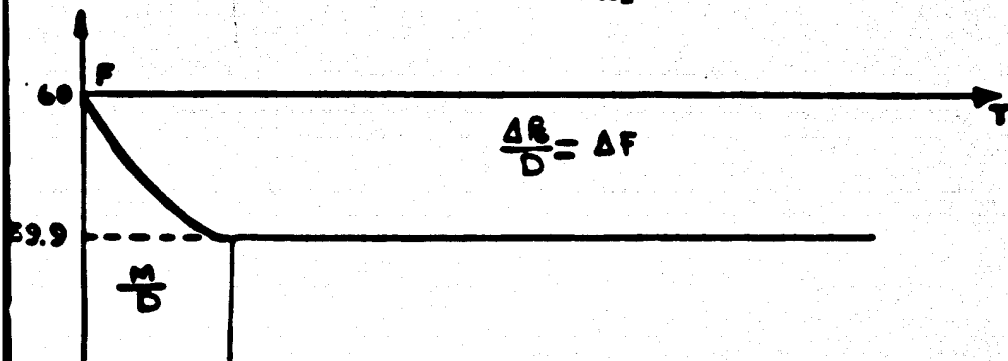


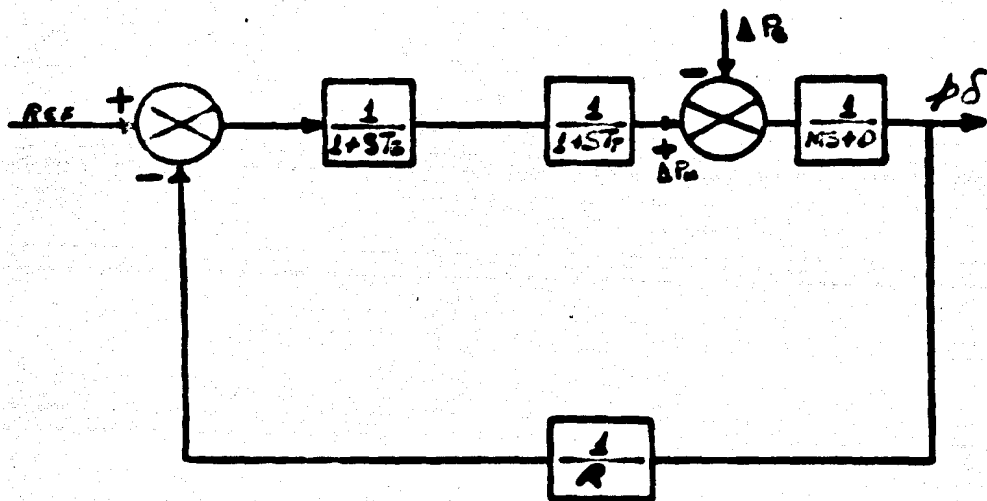
Fig. (II-8)

En conclusión:

Si no existiese ningún sistema de regulación automática, la potencia generada por el conjunto de unidades generadoras variaría en función del tiempo de acuerdo con la acción ejercida sobre los órganos de admisión de las turbinas δ , por el personal de operación de las plantas, que trata de realizar en la forma más aproximada posible, el programa de generación.

Hasta aquí hemos considerado solamente una parte del sistema, o sea, la parte que recibe la energía generada.

Si consideramos que $\Delta P_m \neq 0$, esto implica considerar el resto del sistema, como son el grupo turbina generador incluyendo el mecanismo de control de velocidad para este caso el diagrama de bloques nos quedaría:



Donde:

$\frac{1}{1+sT_G}$; es la ganancia de la función de transferencia del control de velocidad (siendo T_G constante de tiempo del mecanismo gobernador de velocidad).

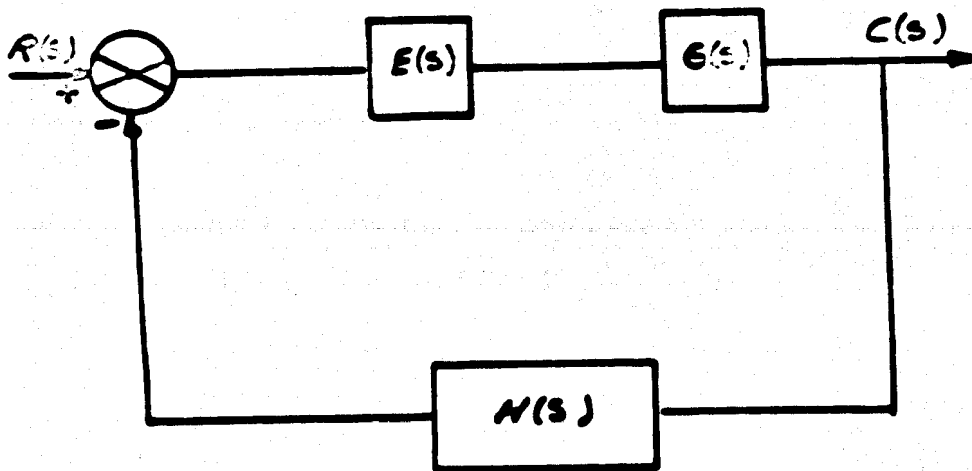
$\frac{1}{1+sT_T}$; es la ganancia de la función de transferencia de la turbina - generador (siendo T_T la constante de tiempo de la turbina-generador).

R ; Es la regulación de velocidad debido a la acción del gobernador.

$\frac{1}{MS + D}$; nos representa el sistema.

Para nuestro estudio no vamos a demostrar como se llega las ganancias anteriores.

Un diagrama de bloques más esquematizado que nos representa al sistema sería:



donde:

$R (S)$ Es la posición de referencia

$E (S)$ Es la acción del control en la turbina

$G (S)$ Es el sistema

H (S) Es la realimentación

C (S) Es la salida del sistema

Como es necesario, adaptar en cada instante la potencia producida por las turbinas a la potencia consumida en el sistema, se deben actuar los controles automáticos de las máquinas por lo cual enfocaremos nuestro estudio al bloque E (S), o sea a la acción del control en las máquinas.

En un sistema eléctrico de potencia, existen dos formas de control, regulación primaria y regulación secundaria, las cuales son normalmente usados para la regulación automática de un sistema.

Esas formas de control serán aplicadas a máquinas individuales a un conjunto de máquinas y por la forma en que afecta en la operación de sistemas serán examinadas con detalle en el siguiente capítulo.

Generalmente estaremos hablando acerca de las respuestas de estado permanente, o sea, las condiciones que prevalece después de las respuestas transitorias iniciales.

CAPITULO III

CONTROL DE CARGA Y FRECUENCIA.

JUSTIFICACION DEL CONTROL DE LA FRECUENCIA.

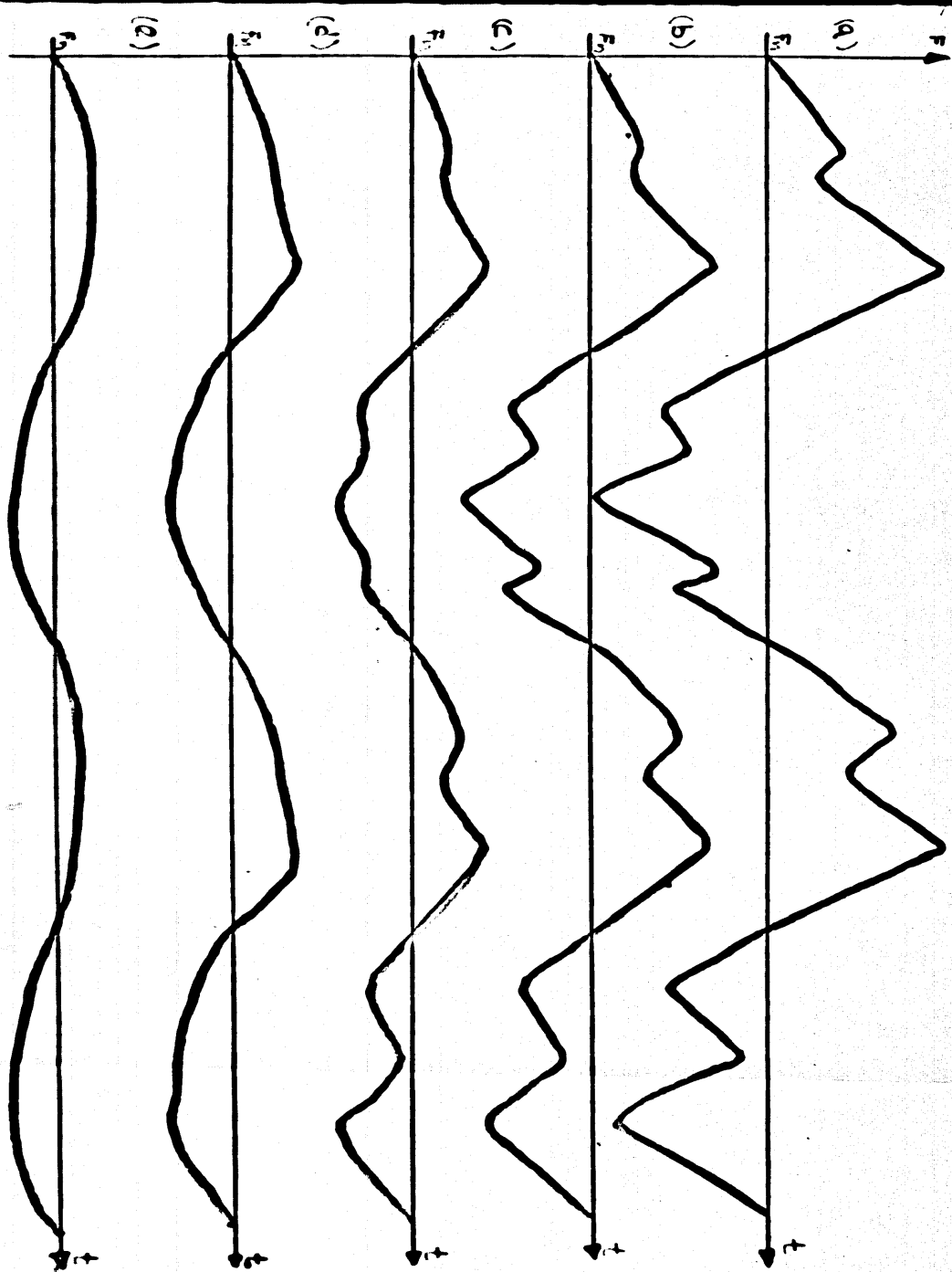
En las siguientes figuras podemos apreciar las siguientes consideraciones así por ejemplo:

La figura (a) se tiene el caso de un sistema cuya frecuencia varia de una forma desordenada a causa de que no se tiene o no se cuenta con ningún tipo de control o regulación.

En la figura (b) se tiene una ilustración de la manera como fluctua la frecuencia del sistema a causa de los constantes cambios en la carga, cuando solo se dispone de un control de tipo manual. Así mismo en las figuras (c), (d) y (e), se muestran los casos de control automático de calidad: regular, buena y excelente respectivamente.

En realidad al usuario no le importa si el control de la frecuencia es de buena o excelente calidad, pues de hecho no está enterado, lo que le interesa es que sus aparatos trabajen normalmente, que el servicio de energía sea continuo y, sobre todo que la energía suministrada sea barata o por lo menos que no aumente de precio. Es por eso que al elegir un tipo de control para el sistema se debe procurar que no aumente el precio al generar energía.

En este punto queremos distraer la atención en el sentido de que la frecuencia del sistema es uno de



Variaciones de frecuencia en el tiempo para un sistema eléctrico de potencia.

Los factores que menos deterioros produce en la vida de un motor ó generador de energía. El control de frecuencia es un medio a través del cual se desarrolla la operación económica de los sistemas de generación, esto es cuanto mas riguroso es el sistema de regulación de la frecuencia tanto mas económico resulta ser el funcionamiento del generador. En los lugares donde existen suficientes energéticos (carbón, petróleo ó ríos) el control pierde importancia porque puede generarse durante mas tiempo toda la energía programada de acuerdo a la evolución de la demanda, reduciéndose al mínimo las posibilidades de que surja una carga inesperada de tal magnitud que empuje a la frecuencia a valores impredecibles.

Existen dos factores importantes en la generación de energía eléctrica que son:

a) Mientras mas combustibles hayan en existencia o mas se ahorren energéticos se pueden generar mayores masas de energía de manera continua, alcanzando así un aumento en los ingresos porque crece el número de usuario de este servicio.

b) Cuando mas barata se venda la energía eléctrica, mayor es el número de personas y empresas que utilizan dicho servicio y por consiguiente, como crece la demanda se eleva los ingresos de la empresa eléctrica.

Por lo tanto en la planeación de un programa de generación para una compañía eléctrica estos dos aspectos deben ser tomados en consideración, ya que el elemento económico es fundamental para tomar cualquier decisión relativa a diseño en un Sistema Eléctrico de Potencia.

En cualquier instante considerado, existe en un sistema de generación eléctrica una diferencia entre la potencia generada (la cual se encuentra bajo el control de los reguladores de velocidad) y la potencia consumida por la carga que se encuentra conectada al sistema; por las siguientes causas.

- 1) El carácter aleatorio de los instantes de conexión o desconexión de las cargas individuales originan fluctuaciones alrededor del valor promedio de la carga total.
- 2) Errores inevitables en los cuales se incurren tanto en los estudios de pronósticos de carga como en los programas de generación realizados.
- 3) Perturbaciones o fallas que pueden surgir dentro del sistema y que obligan, a veces, a sacar de operación alguna línea o elemento del mismo.

Por todas estas causas resulta muy importante.

- a) Disponer de una regulación primaria, para que haga aumentar la generación del sistema, o disminuir--

la, en la misma medida en que lo ha hecho la carga.

b) Disponer de una regulación secundaria, que se encargue de reponer la frecuencia a su valor nominal completando así la operación de la regulación primaria.

c) Procurar que los dispositivos de control usados sean automático porque estos corrigen el error de frecuencia con mayor exactitud, seguridad y rapidez.

TIPOS DE REGULACION.

En este capítulo se estudiarán los principios del control de carga y frecuencia de un sistema eléctrico de potencia, y se aplicará a una unidad simple, así como a varias unidades en paralelo.

El control de carga y frecuencia consiste esencialmente en dos pasos:

- 1.- Mantener un balance entre generación y la carga manteniendo la frecuencia constante.
- 2.- Hacer una asignación de la generación total a las fuentes disponibles para realizar un buen programa de generación.

El paso número uno se puede decir que es tan antiguo como lo es la industria de la conversión de la energía mecánica y su uso. Este tipo de problemas lo tuvo James Watt con su primera máquina de vapor para -

adaptar la demanda a la generación.

James Watt resolvió este problema con el bien conocido regulador diseñado por él, y que es el precursor de los modernos reguladores usados en la actualidad.

Watt se encontró con un solo problema, porque el únicamente tuvo una fuente y fue a esta, a la que necesitó adaptar la demanda de generación. Para sistemas modernos existen muchas alternativas de fuentes. Cada una de las cuales pueden cubrir una parte de la carga total. Esto da como resultado el paso número dos del problema y hace que este sea relativamente complejo.

Primeramente se analizará la regulación primaria -- (paso No.1) de un sistema eléctrico de potencia. Posteriormente se estudiara la segunda fase que es la regulación secundaria.

REGULACION PRIMARIA.

Por lo visto en las expresiones anteriores la diferencia entre potencia generada y potencia consumida provocaría (si no hubiese un sistema de regulación automática), variaciones de frecuencia inadmisibles. Por lo tanto para la autoregulación del sistema, -- las turbinas están provistas de reguladores de (admisión) velocidad automáticos que actúan sobre los órganos de admisión, cuando la velocidad de la turbina

aparta de la velocidad de referencia del regulador. La regulación automática efectuada por los reguladores de velocidad la llamaremos regulación primaria.

El regulador detecta un cambio en la carga por medio de un cambio de velocidad. Por lo tanto si la carga sobre la máquina es incrementada la máquina tenderá a bajar su velocidad.

La acción del regulador es incrementar la entrada a la turbina en proporción inversa a el cambio en la velocidad de la máquina.

En caso de una disminución en la carga, sucede lo contrario. Es decir el regulador de la máquina actúa como un controlador que detecta los cambios de velocidad, de esta manera adapta la potencia generada a las diversas condiciones de carga, deteniendo así la aceleración o desaceleración del sistema. Llegando a un nuevo estado de equilibrio a una frecuencia más baja que la nominal.

CARACTERISTICAS PRINCIPALES DEL REGULADOR

- Es un elemento que informa al primotor de la situación en que se encuentra la unidad.
- A través de un medio adicional sitúa la precisión de la válvula.

A continuación se presentan dos gráficas de operación de un regulador. La primera es para un regulador ideal y la segunda es para un regulador práctico.

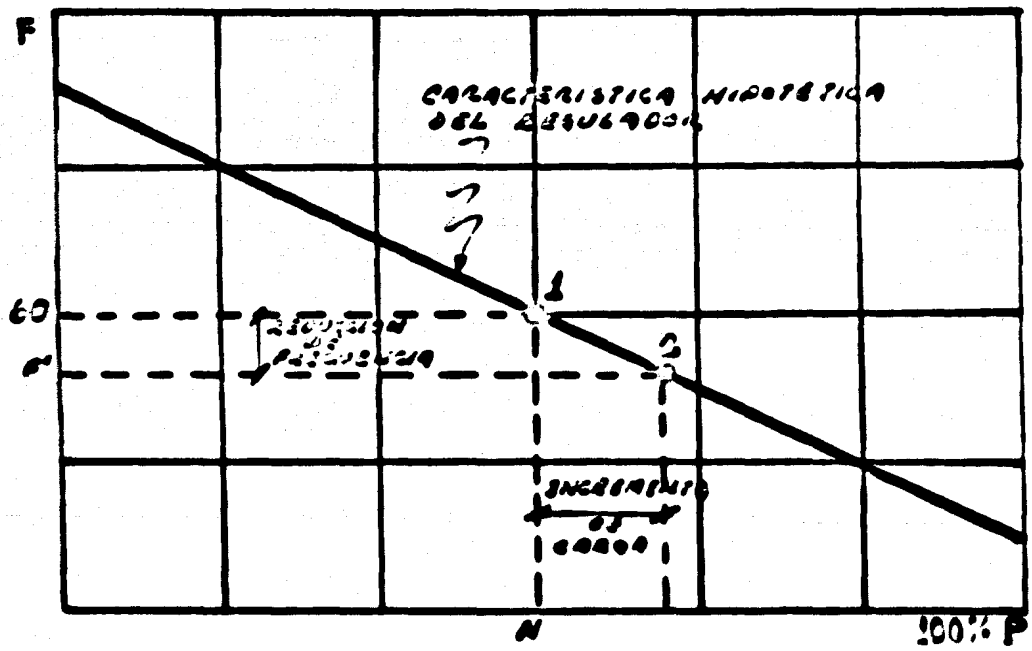


Fig. III-1

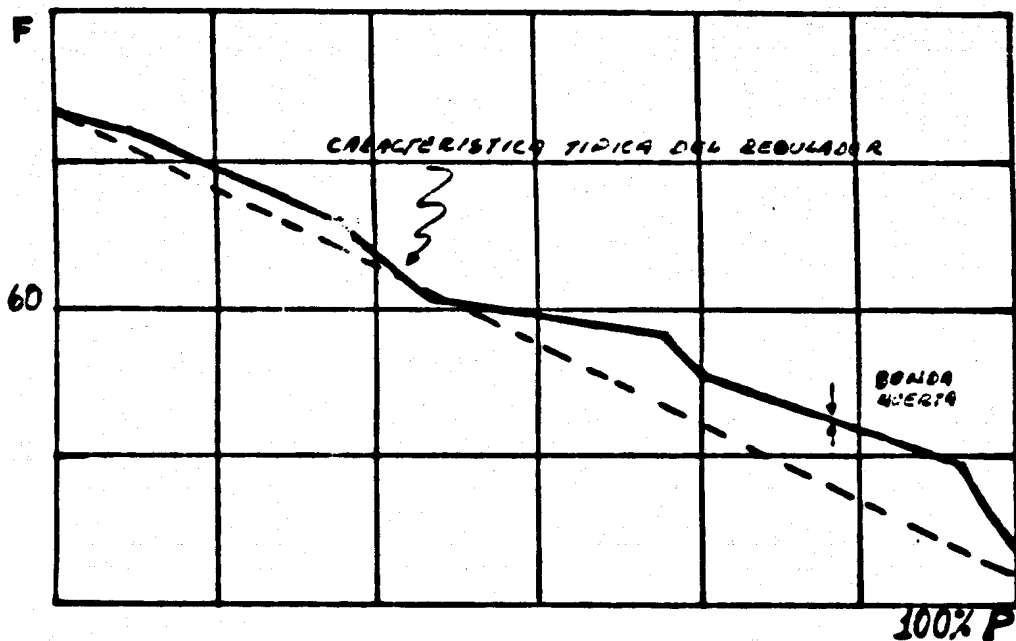


Fig. III-2

Como se podrá observar en la Fig. III-1 se muestra una característica hipotética de un regulador que actúa en una unidad generadora simple. Como tal regulador ideal no existe, la característica es dibujada como una línea recta de carga en vacío a carga nominal o a plena carga.

Así por ejemplo en la Fig. III-1 en los 60 ciclos, la generación prevaeciente es "N" como se observa en el punto (1) de la característica. La frecuencia baja cuando hay un incremento de carga.

El regulador responde automáticamente a la caída de frecuencia, abriendo las válvulas de admisión de la turbina hasta que la desaceleración de la frecuencia es detenida.

En un nuevo estado estable se realiza con un aumento de generación y una baja frecuencia como se observa en el punto (2) de la Fig. III-1

Los reguladores, claro está, no se portan tan perfectamente como en la Fig. III-1 más bien sus características se asemejan a la Fig. III-2, que es una característica típica del regulador actual.

De la Fig. III-2, se observa que: Las caídas de frecuencia se incrementan con los cambios de la válvula. La anchura de la línea indica la banda muerta del regulador.

Aún con las consideraciones anteriores, la característica que se toma en la realidad es la característica representada por la línea punteada de la Fig. III-2

Para poder estudiar esta característica se utiliza un término llamado:

ESTATISMO.

El estatismo de un regulador de velocidad, se define como: La diferencia que existe entre la frecuencia en vacío y la frecuencia nominal. Es decir

$$= f_0 - f_n \text{ (Hz) } \text{-----} \text{ (III-1)}$$

Si lo expresamos en % tenemos

$$E = \frac{f_0 - f_n}{f_n} \times 100 (\%) \text{ ----- (III - 2)}$$

Donde:

f_0 = es la frecuencia en vacio

f_n = es la frecuencia nominal

De la siguiente figura tenemos que: el estadismo está dado también por la tangente de α es decir.

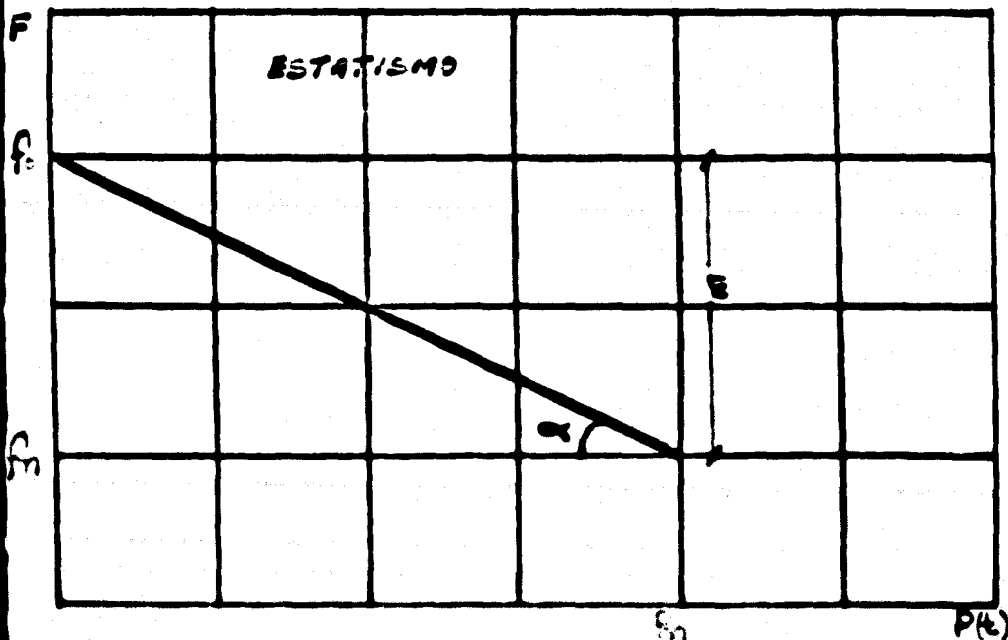


Fig. III - 3

$$\tan \alpha = E = \frac{f_0 - f_n}{f_n}$$

$$E = \frac{\epsilon}{f_n} \quad \text{Dado que } \epsilon = f_0 - f_n$$

$$\epsilon = E f_n \quad (\text{Hz}) \text{ ----- (III - 3)}$$

Existe otra forma para definir la característica de un regulador de velocidad; es en términos de la característica de generación (η_g).

CARACTERISTICA DE GENERACION.

La característica de generación es la relación que existe entre la variación de potencia generadora en kilowatts, y la correspondiente variación de frecuencia en (ciclos/seg) es decir:

$$\eta_g = - \frac{\Delta P_g}{\Delta f} \left[\frac{\text{KW}}{\text{Hz}} \right] \text{ ----- (III- 4)}$$

De esta expresión observamos que a todo incremento de potencia le corresponde un incremento de frecuencia con signo contrario es decir que: a un aumento de potencia generada corresponde una disminución de la frecuencia y viceversa. Debido al signo negativo que aparece en la expresión anterior, η_g resulta positiva.

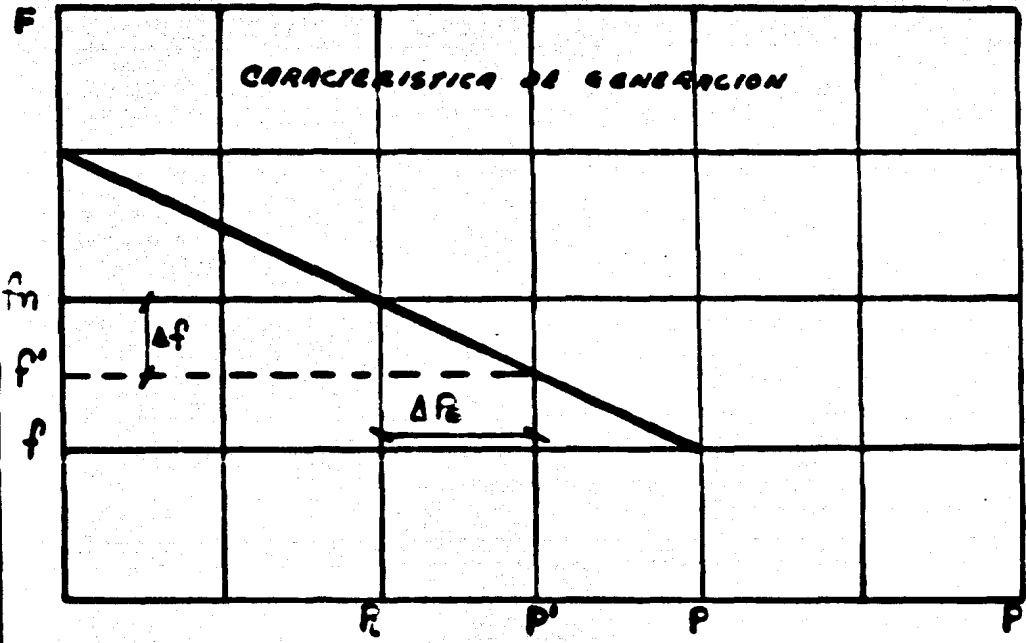


Fig. III - 4

De la figura anterior y aplicando triángulos semejantes tenemos.

$$\eta_G = \frac{\Delta P_G}{\Delta f_n} = \frac{P_n}{E} \dots \dots \dots (III - 5)$$

Pero como:

$$E = f_n E$$

Tenemos que

$$\eta_G = \frac{P_n}{f_n E} \dots \dots \dots (III - 6)$$

Donde $\eta_G = \frac{MW}{H_2}$

$$N_g = \frac{\text{pu. (P)}}{\text{pu. (F)}}$$

Tomemos un ejemplo de aplicación:

Si tenemos una unidad generadora con las siguientes características:

$$P_n = 50 \text{ MW}$$

$$E = 5 \%$$

$$P_i = 30 \text{ MW}$$

$$\Delta P = 8 \text{ MW}$$

Se desea calcular la nueva frecuencia del sistema debido al incremento de potencia.

Solución:

$$\Delta F = f_n - f'$$

De la ecuación III - 6 tenemos

$$N_g = \frac{P_n}{E f_n} = \frac{50}{0.05 \times 60} = 16.05 \left[\frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \right]$$

$$N_g = 16.05 \left[\frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \right]$$

$$N_g = \frac{\text{pu. (P)}}{\text{pu. (F)}}$$

Tomemos un ejemplo de aplicación:

Si tenemos una unidad generadora con las siguientes características:

$$P_n = 50 \text{ MW}$$

$$E = 5 \%$$

$$P_i = 30 \text{ MW}$$

$$\Delta P = 8 \text{ MW}$$

Se desea calcular la nueva frecuencia del sistema debido al incremento de potencia.

Solución:

$$\Delta F = f_n - f'$$

De la ecuación III - 6 tenemos

$$N_g = \frac{P_n}{E f_n} = \frac{50}{0.05 \times 60} = 16.05 \left[\frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \right]$$

$$N_g = 16.05 \left[\frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \right]$$

Por otro lado:

$$N_s = \frac{\Delta P}{\Delta F}$$

$$\Delta F = \frac{\Delta P}{N_s} = \frac{8}{16.05} = 0.49 \text{ (Hz)}$$

De la expresión:

$$\Delta F = f_n - f' \Rightarrow f' = f_n - \Delta F$$

$$f' = 60 - 0.49 = 59.51 \text{ (Hz)}$$

$f' = 59.51 \text{ (Hz)}$ que es la nueva frecuencia que adquiere el sistema al ocurrir el incremento de carga.

RELACION CARGA-FRECUENCIA.

Al resolver cualquier problema debemos tener presente que la carga es función de la frecuencia del sistema y que las características del sistema es igual a la característica de generación de las máquinas + la característica de generación de la carga es decir.

$$N_s = N_g + N_k$$

Donde:

N_s = característica del sistema

N_g = " " de generación

N_k = característica de la carga.

La característica de generación (N_G), es igual a la suma de las características de las diferentes máquinas que componen el sistema.

$$N_G = N_{G1} + N_{G2} + N_{G3} + \dots + N_{Gn}$$

$$N_G = \sum_{i=1}^n N_{Gi}$$

Al construir la siguiente Fig. notamos que aparecen esquematizadas las características de generación y de carga, efectuando una acción combinada, para el caso de un sistema cualquiera. Observando la figura se muestra claramente que a un incremento de carga (ΔC) corresponde una disminución de la frecuencia, desde su valor nominal F_N hasta un valor F_k siguiendo la recta descendente de la característica de generación.

Posteriormente tiene lugar un incremento de la frecuencia hasta alcanzar su valor original: orientado según la característica de la carga.

Por lo tanto tenemos:

$$\Delta C = \Delta G + \Delta K$$

De esta manera el incremento de generación, en el intervalo de tiempo correspondiente es menor que el

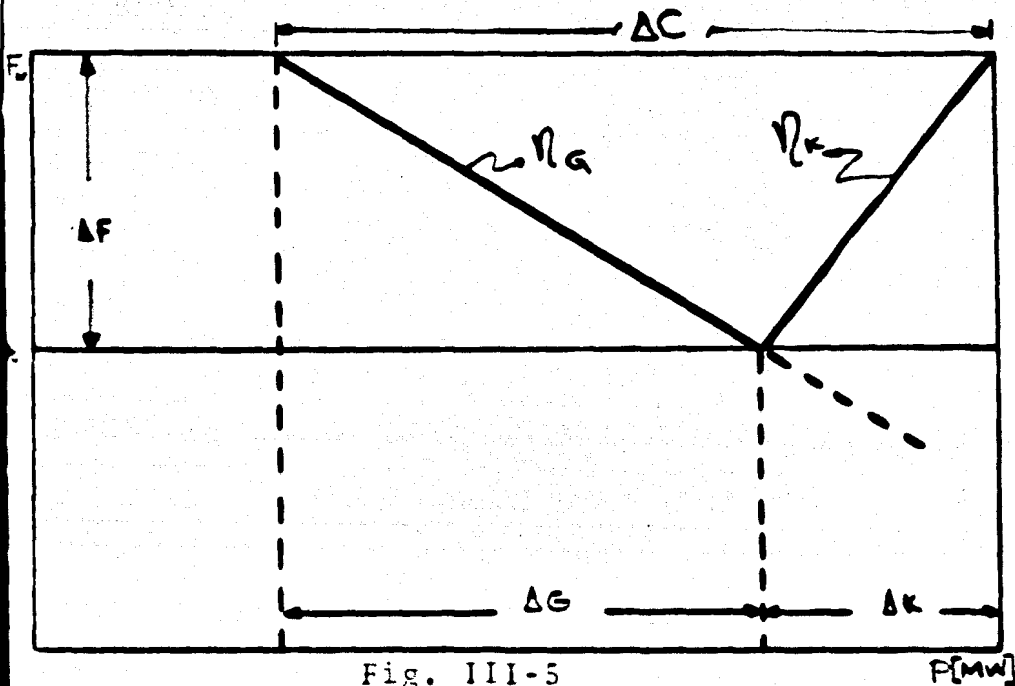


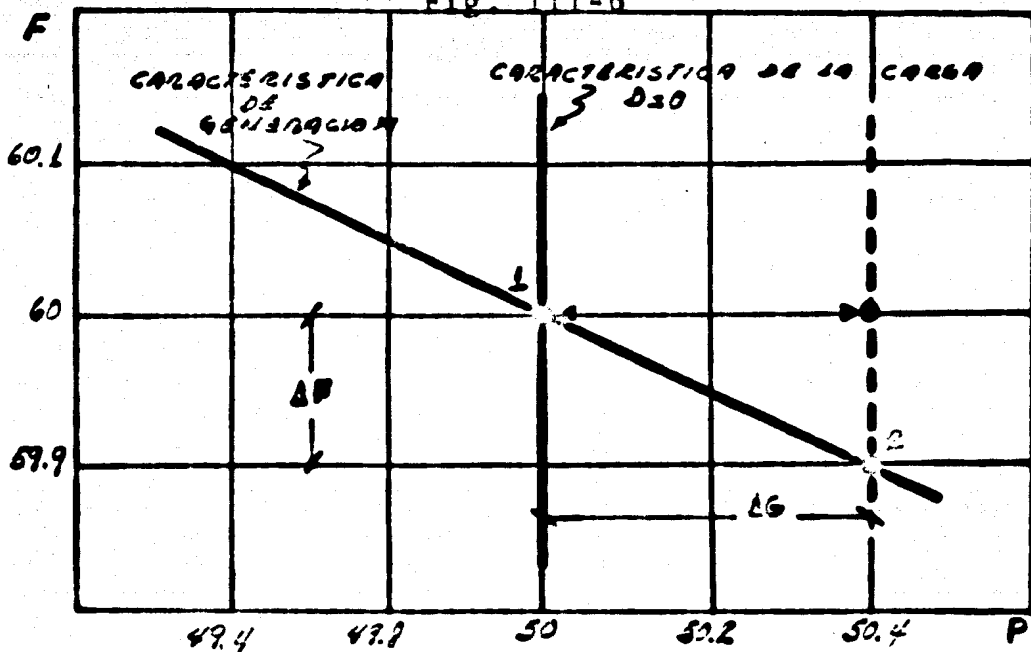
Fig. III-5

P [MW]

aumento de la carga observada.

A continuación estudiaremos la característica FRECUENCIA-POTENCIA, del regulador de velocidad de una turbina para analizar el comportamiento de la turbina cuando se produce un cambio en la carga.

Suponiendo que se tiene una sola unidad. Consideramos primeramente el caso en que la carga del sistema es insensible a la frecuencia (ejemplo clásico es el de una carga puramente resistiva), aquí observamos que su coeficiente de amortiguamiento es cero.

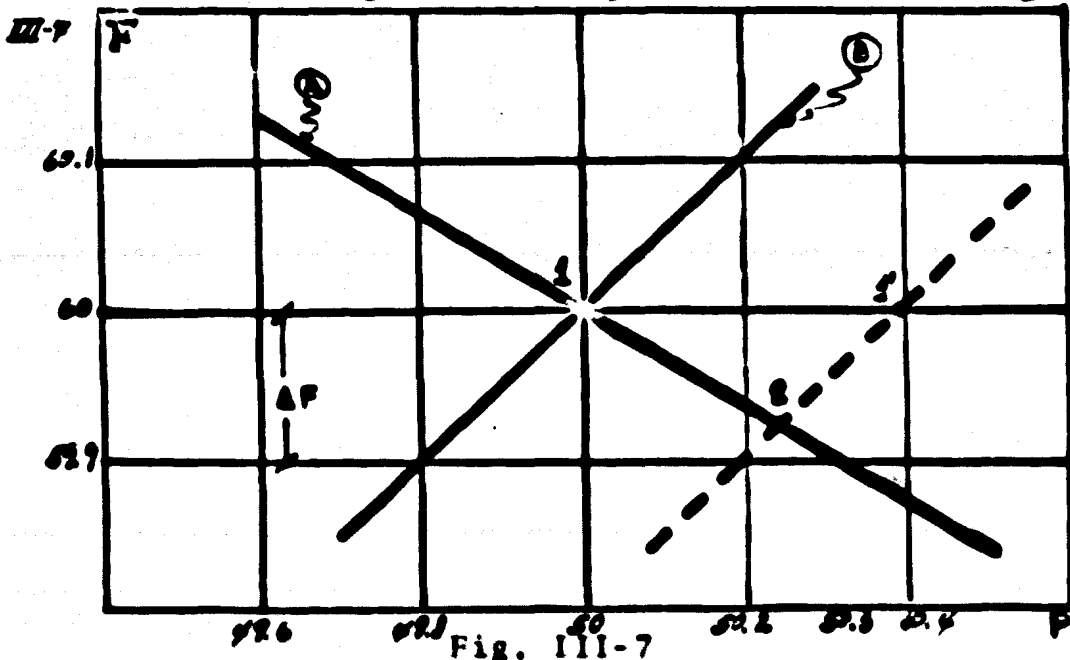


En la fig. III-6 vemos que se tiene inicialmente una carga de 50 MW, y una frecuencia de 60 hertz. Por lo tanto la característica FRECUENCIA - POTENCIA del regulador está definida por una característica de generación de 1 %. Por lo tanto la característica FRECUENCIA - POTENCIA de la carga es una paralela al eje de las ordenadas. Ya que la carga es independiente de la frecuencia. Las dos características se intersectan en el punto (1) para las condiciones iniciales, indicando que la generación es igual a la carga conectada.

Supongamos que aumentamos la carga a 0.4 MW o sea, que la carga total aumenta a 50.4 MW por lo tanto la característica de la carga estará en el punto (2) correspondiente a la abscisa de 50.4 MW., la frecuencia ha disminuido 0.1 ciclos/segundos de tal manera que

la frecuencia total ahora es igual a 59.9 ciclos/segundos.

Considerando ahora el caso en que la carga del sistema varía con la frecuencia es decir que su coeficiente de amortiguamiento es mayor que cero. Suponiendo que la carga está definida por una característica de generación de 0.5% (0.1 ciclo/seg.) se tendrá que para el punto (1) la característica de regulación --- (recta fig. III-6) será perpendicular a la característica de la carga. A como puede verse en la Fig.



En donde: (A) es la característica de regulación.

(B) es la característica de la carga $D \neq 0$.

Ahora bien si conectamos una carga de 0.4 MW la característica de la carga se desplaza paralelamente - así misma, hasta pasar por el punto (1') definido - por una potencia de 50.4 MW y 60 ciclos/seg. Una vez que se amortigua el transitorio causado por la variación de la carga, el nuevo punto de equilibrio (2) - está definido por la intersección de la característica de la carga.

Finalmente la unidad queda suministrando 50.3 MW a - una frecuencia de 59.94 ciclos/seg. por lo que debido al efecto amortiguador en la disminución de carga, - al disminuir la frecuencia el aumento de carga en la unidad generadora ha sido finalmente de sólo 0.30 -- MW.

ESTADISTMO Y CARACTERISTICA DE GENERACION DE UN SISTEMA.

Consideremos ahora el conjunto de un sistema alimentado por varias unidades en paralelo, todas ellas -- provistas de un regulador de velocidad, por lo que - toda variación de carga provocará una variación de - frecuencia. La amplitud de esta variación será fun- ción del estadismo individual de los diversos regula- dores primarios y del coeficiente de amortiguamiento del sistema.

Definiendo como estadismo de un sistema E_s , a la va-

variación de frecuencia en por unidad, que provocaría una variación de carga igual a la potencia consumida en ese instante.

$$s = \frac{\frac{f_0 - f'}{f_n}}{\frac{P}{P_n}} \quad \text{Si} \quad P = P_n$$

$$s = \frac{f_0 - f'}{f_n}$$

nde:

- = frecuencia con carga cero
- = " " " " P
- = frecuencia nominal
- = carga del sistema
- = carga nominal

comportamiento del sistema se puede expresar en función de la característica de generación del sistema que está directamente ligado al estatismo. Este comportamiento lo analizaremos para dos sistemas de unidades.

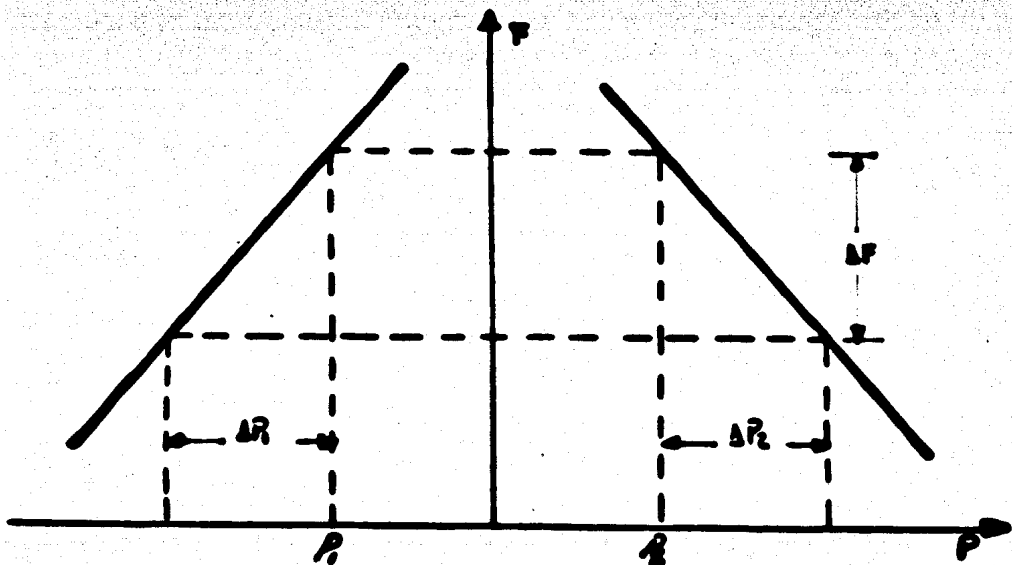


Fig. III-8

De la Fig. III-8 deducimos:

$$\Delta F_s = \Delta F_1 = \Delta F_2$$

$$\Delta P_s = \Delta P_1 + \Delta P_2$$

Y como sabemos que la característica de generación de un sistema R_g alimentado por varias unidades en paralelo la definimos como:

R_g es igual a la relación que existe entre una variación de carga y la correspondiente variación de frecuencia es decir matemáticamente tenemos que:

$$R_g = \frac{\Delta P}{\Delta F}$$

En el sistema de dos unidades se tiene

$$N_{G3} = N_{G1} + N_{G2}$$

Si lo hacemos para n unidades se tiene lo siguiente:

$$N_{G3} = N_{G1} + N_{G2} + N_{G3} + \dots + N_{Gn}$$

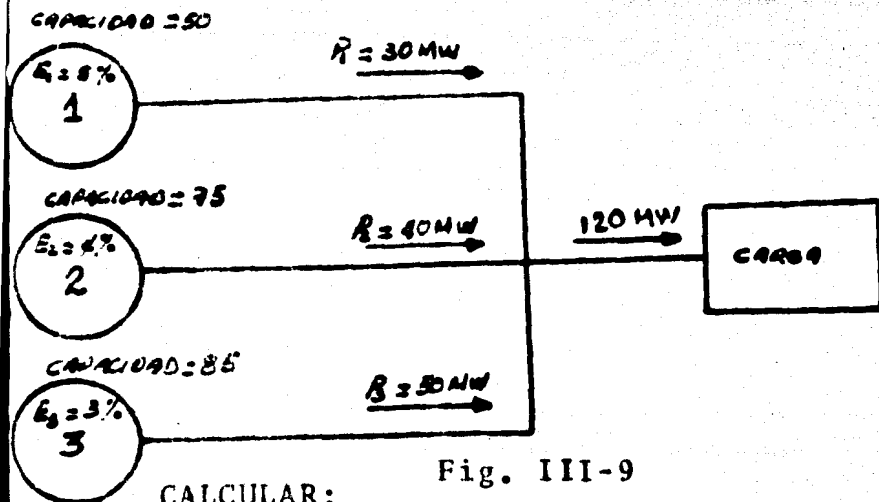
Comentario: El valor de la característica de generación de un sistema (o de su estatismo) caracterizan la calidad de regulación primaria de un sistema es - decir: Las variaciones de la carga que aparecen en - este sistema, provocan variaciones de frecuencia inversamente proporcionales a la característica de generación primaria N_G

Por todo lo anterior, es conveniente que la característica de generación primaria de un sistema sea suficientemente elevada δ , en otras palabras que el estatismo del sistema sea suficientemente bajo.

Consideraremos un ejemplo de aplicación de los conceptos hasta aquí definidos. Ejemplo:

Considérese el sistema mostrado en la Fig. III-9; supóngase que el sistema está inicialmente operando a 60 ciclos/seg. alimentando la carga de 120 MW indicada, y que sólo se dispone de la regulación primaria debida a la acción de los reguladores de velocidad - de las turbinas.

1.- Si consideramos que la carga es insensible al -- cambio de frecuencia tenemos:



CALCULAR:

- Característica de generación de la unidad (1)
- " " " " " " (2)
- " " " " " " (3)
- El nuevo valor de la frecuencia si la carga aumenta 40 MW.
- Que parte de este aumento de carga de 40 MW tomará cada máquina.

SOLUCION.

- Aplicando la ecuación (III-6) la característica de generación de la unidad (1) es:

$$P_{G1} = \frac{P_D}{f_n E} = \frac{50}{60(0.05)} = 16.6 \left[\frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \right]$$

- Haciendo lo mismo que en el inciso anterior.

$$P_{G2} = \frac{75}{60(0.04)} = 31.25 \left[\frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \right]$$

c).- Para la unidad (3)

$$R_{G3} = \frac{85}{60(0.03)} = 47.22 \left[\frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \right]$$

Por lo tanto aplicando la ecuación.

$$R_{G5} = R_{G1} + R_{G2} + R_{G3} + \dots + R_{Gn}$$

Tenemos que:

$$R_{G5} = 16.6 + 31.25 + 47.22$$

$$R_{G5} = 95.07 \left[\frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \right]$$

Y sabemos que:

$$R_{G5} = \frac{\Delta P_s}{\Delta F_s}$$

$$\Delta F_s = \frac{\Delta P_s}{R_{G5}}$$

Para el ejemplo tenemos que:

$$\Delta F_s = \frac{40}{95.07} = 0.4207 \text{ (Hz)}$$

d).- Suponiendo que nada más actúa la regulación primaria, el nuevo valor de la frecuencia al aumentar la carga en 40 MW es.

$$f = f_n - \Delta F_s = 60 - 0.42 = 59.58 \text{ (HZ)}$$

e).- Si se tiene que:

$$\Delta P_1 = \Delta F_s \eta_{G_1} = (0.4207) (16.6) = 6.988 \text{ (MW)}$$

$$\Delta P_2 = \Delta F_s \eta_{G_2} = (0.4207) (31.25) = 13.147 \text{ (MW)}$$

$$\Delta P_3 = \Delta F_s \eta_{G_3} = (0.4207) (47.22) = 19.865 \text{ (MW)}$$

como comprobación se obtiene lo siguiente:

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = \Delta P_s$$

$$6.988 + 13.147 + 19.865 = 40 \text{ (MW)}$$

COMENTARIOS.

Podemos observar que con la sola acción de la regulación primaria se llega a generar el aumento total de carga en el caso de que esta sea insensible al cambio de frecuencia.

2).- Como número adicional a este problema resolveremos el mismo, pero ahora vamos a considerar que la carga varía con la frecuencia.

Como la carga varía con la frecuencia entonces $D \neq 0$

Por lo tanto el coeficiente de amortiguamiento del sistema es:

$$D = \frac{1 \% \Delta P}{1 \% \Delta F} = \frac{1 \% Pf}{1 \% f_n} = \frac{0.01 (120+40)}{0.01 (60)} = 2.66$$

$$\left(\frac{\text{MW}}{\text{HZ}} \right)$$

La solución de los incisos a), b), c), del problema no cambian de valor ya que el estatismo, la potencia nominal, y la frecuencia nominal no cambian.

Para resolver el inciso d), se procede como sigue:

$$\Delta F'_s = \frac{\Delta P}{V_{Ls} + D} = \frac{40}{95.07 + 2.66} = 0.4092 \text{ (HZ)}$$

De donde:

$$f' = 60 - 0.4092 = 59.5908 \text{ (HZ)}$$

e).- Para el aumento de carga se repartirá de la siguiente manera.

$$\Delta P'_1 = \Delta F'_s V_{L1} = (0.4092) (16.6) = 6.79 \text{ (MW)}$$

$$\Delta P'_2 = \Delta F'_s V_{L2} = (0.4092) (31.15) = 12.78 \text{ (MW)}$$

$$\Delta P'_3 = \Delta F'_s V_{L3} = (0.4092) (47.22) = 19.32 \text{ (MW)}$$

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = 6.79 + 12.78 + 19.32 = 38.89 \text{ MW}$$

COMENTARIOS.

Se observa que el aumento real de carga, con el sistema operado a 59.59 Hz ha sido de 38.89 MW, en lugar de 40 MW. Esto se debe a que el coeficiente de amortiguamiento es diferente de cero. Esto se observa claramente en el paso del punto 1 a 2 de la Fig.

III-7

CONCLUSION.

Del ejemplo desarrollado, podemos concluir que con el control primario, no es posible generar totalmente el cambio de carga que se presenta, así como restaurar la frecuencia a su valor nominal.

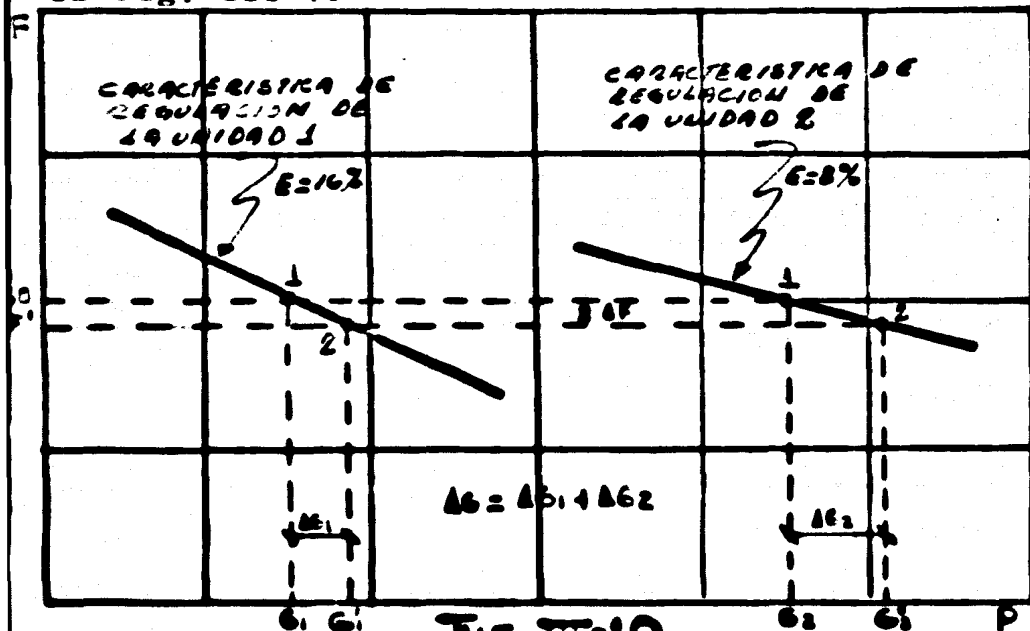
A continuación estudiaremos y analizaremos como se lleva a cabo la distribución del cambio de carga entre diferentes unidades por medio de la regulación primaria.

REASIGNACION DE CAMBIOS DE CARGA A DIFERENTES UNIDADES POR MEDIO DE REGULACION PRIMARIA.

Primeramente consideraremos para este análisis que nuestra carga no varía con la frecuencia y los resultados como veremos serán cuantitativamente diferentes, pero cualitativamente iguales cuando considera-

emos que la carga varia con la frecuencia.

onsiderando que el sistema consta de dos unidades:
 1 y G2, a una frecuencia de 60 Hz. como se observa
 n la Fig. III-10



La gráfica de la Fig. III-10 nos indica como respon-
 den las unidades al cambio de carga, observando la
 unidad G1 se ve que tiene un estatismo del 16% y ab-
 sorberá una cantidad menor de carga que la unidad G2,
 que tiene un estatismo del 8%. También de la Fig. an-
 terior vemos que la unidad G1 aumenta su generación
 en ΔG_1 , la cual es de magnitud menor que la genera-
 ción de la unidad G2, que es ΔG_2 , así la suma de
 los dos incrementos será igual al cambio total de
 carga:

$$\Delta G_1 + \Delta G_2 = \Delta G$$

La función del regulador realizando el paso (1) y -- (2) de la Fig. III-10 hace alguna clase de reasignación entre las fuentes de operación. Hacemos notar -- que esta reasignación se hizo en base a las características de los reguladores de las unidades, pero no necesariamente la óptima deseada. Así por ejemplo -- digamos que para un determinado tiempo las curvas de carga económica y óptima son tales que la unidad G2 debería haber permanecido en carga base, mientras -- que la unidad G1, debería haber tomado todo el cam-- bio de carga del sistema.

Pero lo que en realidad sucede, es que la caracterís-- tica de los reguladores son tales que como se mues-- tran en la Fig. III-10 (La unidad G2 toma más del cam-- bio de carga que lo que toma la unidad G1). Obviamen-- te las respuestas del regulador no da la reasigna--- ción óptima deseada.

Para observar con mayor claridad esta característica la podemos ver en la Fig. III-11. Que nos muestra lo que deseamos y lo que en realidad se obtiene.

La generación deseada y obtenida de la unidad 1 se muestra en la sección inferior, mientras que la gene-- ración obtenida y la deseada de la unidad 2 se mues-- tra en la sección superior. La generación total de -- las dos unidades se muestra sobre la coordenada ho-- rizontal.

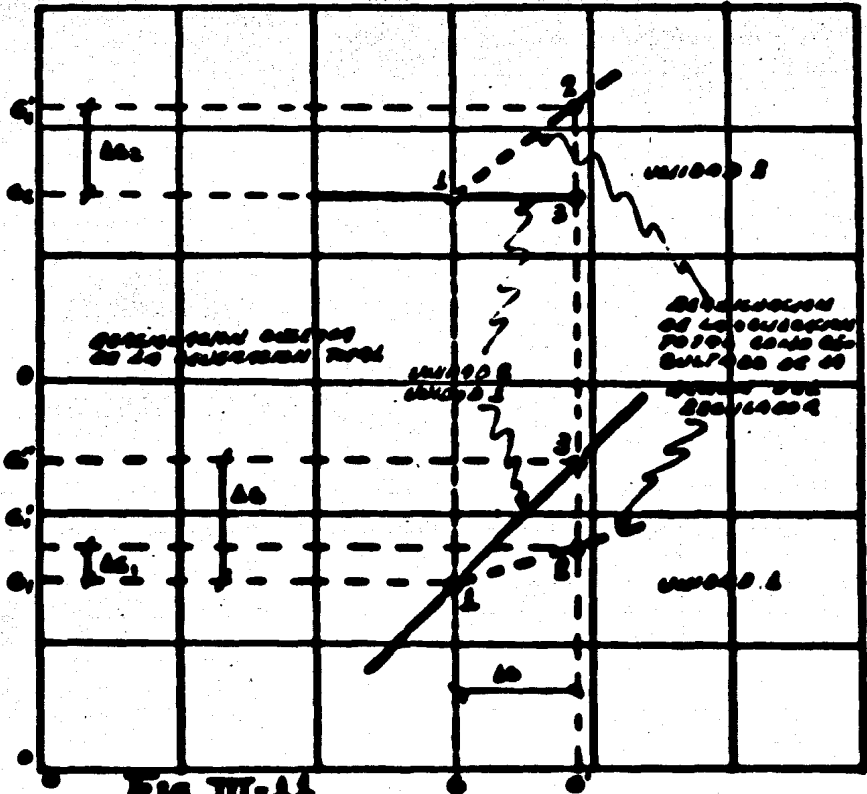


FIG. III-11

Las líneas continuas (X) son reasignaciones deseada de la generación total las líneas punteadas son las reasignaciones de la generación total como resultado de la acción del regulador explicada en la Fig. III-10.

Ahora bien empezamos con una generación inicial total G y se esta en equilibrio en los puntos marcados con el número (1); por lo tanto la unidad uno tiene una generación G1 mientras que la unidad dos tiene una generación G2 ambas generaciones están sobre la recta programada de carga óptima a este punto le corresponde una frecuencia de 60 Hz.

Como se puede ver la generación total puede ser mayor o menor que G , por lo tanto se quiere que la unidad dos permanezca en una carga base como lo muestra la recta de generación deseada.

Al mismo tiempo queremos que la unidad uno tome todo el cambio de carga como lo muestra su recta de generación deseada.

Las dos rectas punteadas muestran como se realizan el cambio de generación debido al cambio de carga, es por eso que van de una generación total G al nuevo valor de G' , también podemos observar que para un cambio total de generación ΔG , la unidad uno toma ΔG_1 , mientras que la unidad dos toma ΔG_2 . Estas respuestas de los reguladores al cambio de carga son: G_1' y G_2' respectivamente que corresponden a los puntos marcados con el (2) de la recta. Pero las cargas que nosotros queramos son G_1'' y G_2'' que corresponden a los puntos marcados con el número (3) sobre las rectas. Pero obviamente no podemos contar con los reguladores (control primario) para tener una reasignación óptima deseada. Solo podemos contar con ellos para resolver el primer paso en nuestro problema de control de generación, es decir, el de acoplar la generación total a la carga total.

Por lo tanto se necesita alguna otra forma adicional que modifiquen las respuestas iniciales de los reguladores para una reasignación óptima, es decir, se -

ecesita variar de alguna manera las características del regulador de tal modo que nosotros podamos reasignar cada nuevo cambio de carga a la máquina que nosotros deseamos.

La solución del problema expuesto lo hace la regulación secundaria, la cual se analiza a continuación.

REGULACION SECUNDARIA.

Por lo visto en la sección anterior, se demostró que si disponemos únicamente de regulación primaria proporcionada por los reguladores de velocidad de la turbina. La diferencia entre la potencia en la carga y la potencia generada causará una desviación de frecuencia con respecto a la frecuencia nominal. Por lo que la acción del regulador da al sistema la estabilidad básica para su operación igualando la potencia generada a la potencia demandada, pero a una frecuencia menor que la nominal. Por lo tanto si la situación anterior no se corrige, el error de frecuencia puede llegar a alcanzar valores inadmisibles.

Restaurar el sistema a la frecuencia base deseada es la función de la regulación secundaria, o sea, en la regulación secundaria lo que se trata es de restablecer la frecuencia a su valor nominal, y para lograr esto será necesario actuar sobre el dispositivo de reajuste hasta que el equilibrio entre la generación

y, la carga se restablezca a la frecuencia nominal.

Por lo general el dispositivo de reajuste es actuado por un pequeño motor de corriente continua llamado - Motor de Sincronismo.

Esta regulación secundaria se puede llevar a cabo manualmente o automáticamente, si se hace en forma manual el motor de sincronismo se controlará desde el tablero de la máquina. O si se realiza en forma automática bastará medir la frecuencia del sistema y compararla con la frecuencia nominal producida por un - generador de frecuencia patrón.

Con esto se obtiene así el error de frecuencia Δf . Produciendo una señal que actúa en un emisor de im-pulsos que a su vez actúa sobre el motor del dispositivo de reajuste en el sentido de aumentar o dismi-nuir la generación, según sea el signo del error de frecuencia.

En esencia, el control secundario es una serie de - pulsos de control que actúan directa o indirectamente sobre el motor de sincronismo. Esta acción persiste hasta que el error de frecuencia se reduce a cero. El control secundario se puede realizar en algunas - formas diferentes como las que mencionamos a conti-nuación.

1.- Por medio de una serie de pulsos de control de - igual amplitud y una frecuencia constante.

2.- Por medio de una serie de pulsos de control cuya amplitud y/o frecuencia es una función de la magnitud del error.

3.- Adaptando la acción del control a la característica de carga.

A continuación revisaremos los pasos fundamentales - envueltos en la variación de las características de un regulador en operación debido a la acción de control secundario.

Esto nos ayudará a aclarar un punto omitido frecuentemente cuando se analiza el efecto de acción del control secundario manual o automático en el efecto neto de generación de una máquina. Dicho punto es que mientras que la acción del control secundario está variando la característica del regulador de velocidad, debido al control primario induce cambios rápidos, al sistema, o sea la acción del control secundario siempre irá acompañada de la acción del regulador.

Todo lo anterior se puede ver mas claramente si consideramos un generador aislado llevando el total de carga. Si inicialmente la generación total es igual a la carga total y asumimos que la carga no varía con la frecuencia entonces, en condiciones balanceadas imponemos una acción del control secundario en -

la máquina, por lo cual, la fuerza de la turbina y la generación en ese momento se incrementan, pero como no hay carga adicional para tomar esta generación adicional, se acelera el sistema, el regulador de la turbina detecta el rápido incremento de velocidad y lo que hace es cerrar las válvulas de admisión para detener la aceleración. Cuando todo esto sucede, la velocidad de la turbina y la generación regresan a su estado inicial, y se acoplan de nuevo a la carga instalada. Pero ahora la frecuencia del sistema es más alta en una cantidad correspondiente a la cantidad de energía adicional almacenada y adicionada en las partes giratorias del sistema. Por lo tanto se debe tomar en cuenta que cuando operamos la regulación secundaria manualmente o con un control automático estamos al mismo tiempo induciendo acción de generación adicional necesitada, para mantener sobre todo el balance entre la generación total y la carga total. Como se ilustra en la Fig. III-12 (se va a considerar el regulador del sistema individual).

Empezando en condiciones balanceadas a 60 Hz y con una generación G que corresponde al punto (1) en la característica inicial de generación AA.; ahora bien si se produce un aumento de carga ΔG hasta llegar a G' como resultado de la acción del regulador, como se observa el sistema será balanceado.

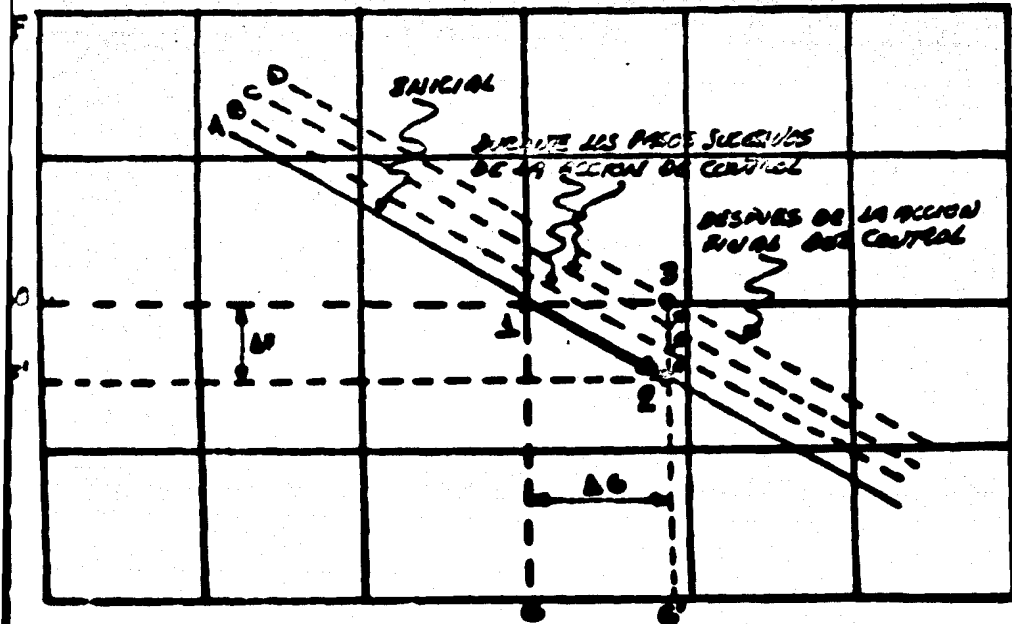


Fig. III-12

Si caminamos del punto (1) al punto (2) en la característica inicial de generación y la frecuencia en este paso estará más baja que el valor nominal. Ahora si queremos restaurar la frecuencia a 60 Hz, suponiendo que lo hacemos manualmente operando el control secundario, esto variará la característica de generación del regulador a la nueva posición paralela BB, haciéndose así, nuestra generación se habrá incrementado para ser más alta que nuestra carga como se indica con la flecha del punto (2) a la característica BB; la frecuencia aumentará.

Por lo tanto nuestro sistema cuando perciba la aceleración, el regulador regresará la generación hasta que esté balanceada con la carga.

Esto se muestra con la flecha que está sobre la característica de generación BB, estamos en condiciones balanceadas nuevamente. La generación extra que se genera temporalmente ha sido almacenada dentro de la energía giratoria del sistema aumentando la frecuencia arriba de F' , pero como todavía no regresamos a 60 Hz, por eso es que realizamos otro paso. Otro aumento manual sobre el control secundario variará la característica del regulador a la nueva posición CC como se observa en la Fig. III-12.

Quando se incrementa la generación mas allá de la -- carga existente, el sistema se acelera otra vez y en tonces por acción del regulador, nuevamente se dismi nuye la generación para balancear la carga. Como se muestra con la flecha que va sobre la característica CC.

Así continuamos hasta que nos extendemos al punto - (3) en la característica final del regulador DD. En una serie de pasos en cadena. De esta forma en que - se fue del punto (2) en la característica inicial al punto (3) sobre la característica DD, regresamos a - 60 Hz, que es la frecuencia nominal del sistema te-- niendo nuestra generación balanceada con la carga. - Pero mientras tanto hemos permitido que la genera-- ción fuera excesiva en cada paso, para que la ener-- gía almacenada en las partes giratorias de la máqui- na permitiera restablecer la frecuencia nominal.

Un punto importante que podemos notar es que la co-- rrección de frecuencia en el análisis final es el -- realmacenamiento de la energía almacenada del siste- ma. Cuando las partes giratorias dan el valor apro-- piado, el sistema tendrá una frecuencia de 60 Hz, la corrección de frecuencia luego entonces, es una par- te de la energía almacenada. Por otro lado si consi- deramos que la carga varía con la frecuencia, el aná- lisis es el mismo que se realizó para cuando la car- ga no varía con la frecuencia por lo que los resulta

dos prácticos son diferentes en cuanto al valor numé-
rico, pero los conceptos son los mismos.

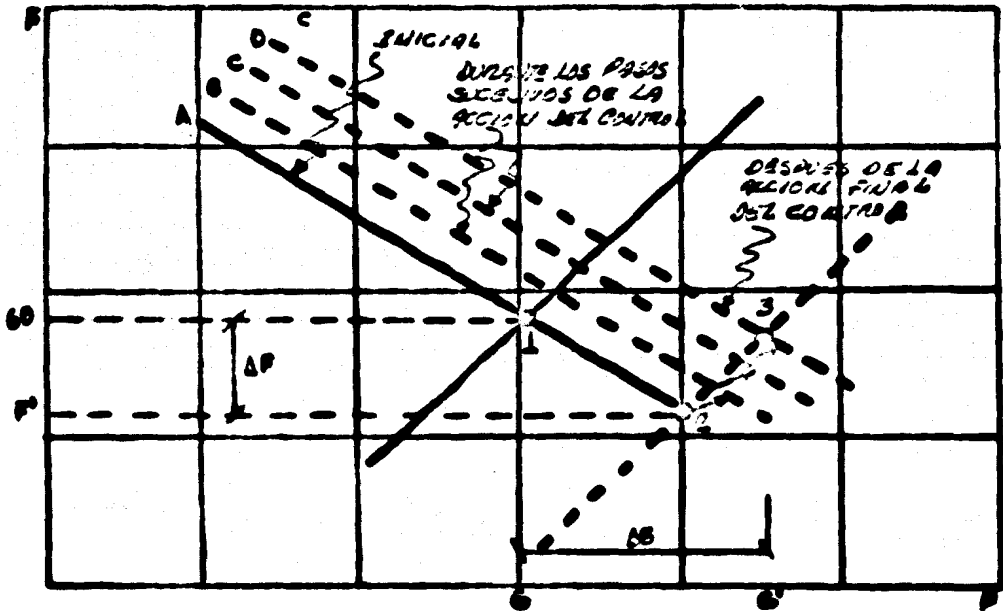


Fig. III-13

En secciones anteriores se ha visto que el estatismo de un regulador está dado por la tangente del ángulo α , considerando la variación de frecuencia que existe entre la frecuencia en vacío y la frecuencia nominal.

Como consecuencia de la regulación secundaria esta recta experimenta un desplazamiento como se observa en la Fig. III-14.

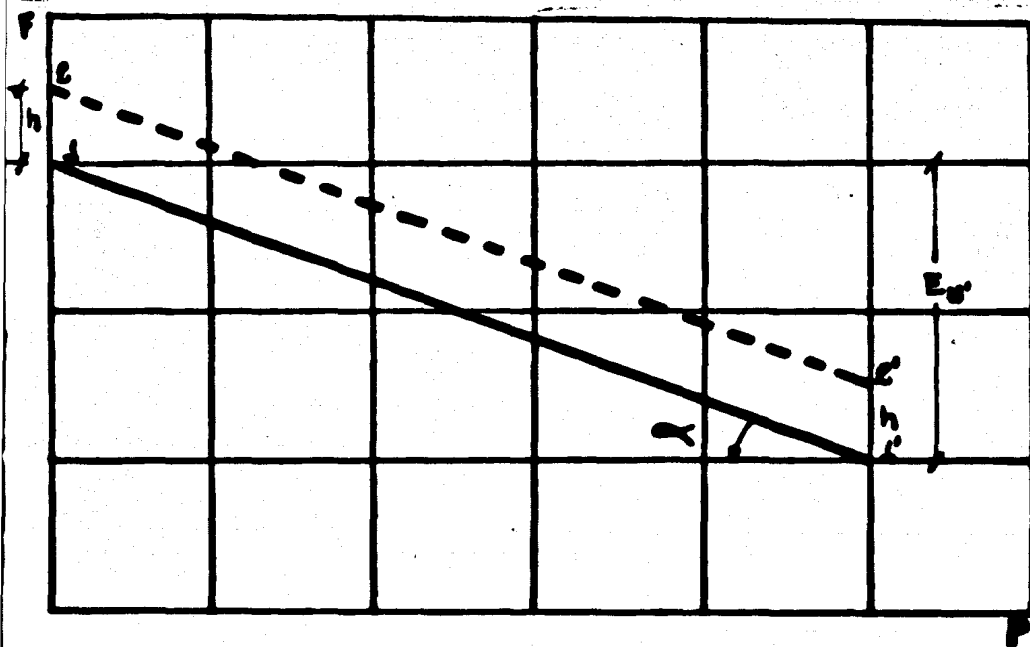


Fig. III - 14

Si hacemos la consideración de que la recta ZZ' se -
desplaza paralelamente a la recta TT', y si llamamos
"h" a la diferencia de ordenadas entre las dos rec-
tas podemos escribir:

$$E'_{22} = E'_{11} + h$$

Como se había visto anteriormente

$$E'_{11} = \frac{f_0 - f_n}{f_n}$$

Por lo tanto

$$E'_{22} = \frac{f_0 - f_n}{f_n} + h$$

Como podemos observar, el dispositivo de reajuste - permitirá variar la magnitud de "h".

Si consideramos que la máquina está conectada a un sistema muy grande que permita considerar la frecuencia constante, o sea, donde una variación de la generación de la unidad no afecte sensiblemente la frecuencia del sistema entonces una modificación de "h" causará una modificación de la potencia generada, de esta manera si se desea realizar cierto programa de generación se operará el dispositivo de reajuste lo que equivale a ajustar "h" de manera que cuando la frecuencia sea igual a la frecuencia nominal, la potencia generada sea igual a la potencia programada.

CAPITULO IV

DIAGRAMAS DE CAPABILIDAD PARA LAS MAQUINAS SINCRONAS DE ROTOR CILINDRICO Y POLOS SALIENTES

OBTENCION DE LAS POTENCIAS ACTIVAS Y REATIVAS MAXI--
MAS PARA UNA MAQUINA SINCRONA DE ROTOR CILINDRICO.

Para la obtención de las potencias activas y reactivas máximas de una máquina síncrona de rotor cilíndrico, partiremos de la ecuación (I-4), la cual nos determina la potencia terminal en dicha máquina.

$$S = \frac{E_t E_q}{X_d} e^{j(\pi/2 - \delta)} - j \frac{E_t^2}{X_d}$$

desarrollando la ecuación anterior tenemos que:

$$S = \frac{E_t E_q}{X_d} [\cos(\pi/2 - \delta) + j \sin(\pi/2 - \delta)] - j \frac{E_t^2}{X_d} \text{-----(IV-1)}$$

teniendo en cuenta que:

$$\begin{aligned} \sin(\pi/2 - \delta) &= \sin \pi/2 \cos \delta - \sin \delta \cos \pi/2 \\ \cos(\pi/2 - \delta) &= \cos \pi/2 \cos \delta + \sin \delta \sin \pi/2 \end{aligned}$$

sustituyendo estas dos últimas expresiones en la ecuación (IV-1) tenemos que:

$$S = \frac{E_t E_q}{X_d} (\sin \delta + j \cos \delta) - j \frac{E_t^2}{X_d} \text{-----(IV-2)}$$

a expresión (IV-2) nos representa un círculo cuyo

$$\text{Radio} = \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q}{X_d} = \bar{C}$$

$$\text{Centro} = \frac{\bar{E}_t^2}{X_d} = \bar{A}$$

de la ecuación (IV-2) podemos notar que la potencia aparente S se encuentra formada por un fasor de módulo \bar{E}_t^2/X_d con una dirección negativa sobre el eje Q , por un segundo fasor de módulo $\bar{E}_q \bar{E}_t/X_d$ cuya dirección se encuentra determinada por el fasor unitario $(\sin \delta + j \cos \delta)$ que variará conforme a nuestro ángulo de potencia δ varie.

Tomando en cuenta que los valores que tiene nuestro diagrama circular se encuentra en valores nominales, por lo tanto nuestro ángulo de potencia δ lo consideraremos como nominal (δ_n)

Desarrollando nuestra ecuación (IV-2) tenemos que:

$$S = \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q}{X_d} \sin \delta + j \left[\left(\frac{\bar{E}_t \bar{E}_q}{X_d} \cos \delta - \frac{\bar{E}_t^2}{X_d} \right) \right]$$

además sabemos que:

$$S = P + j Q$$

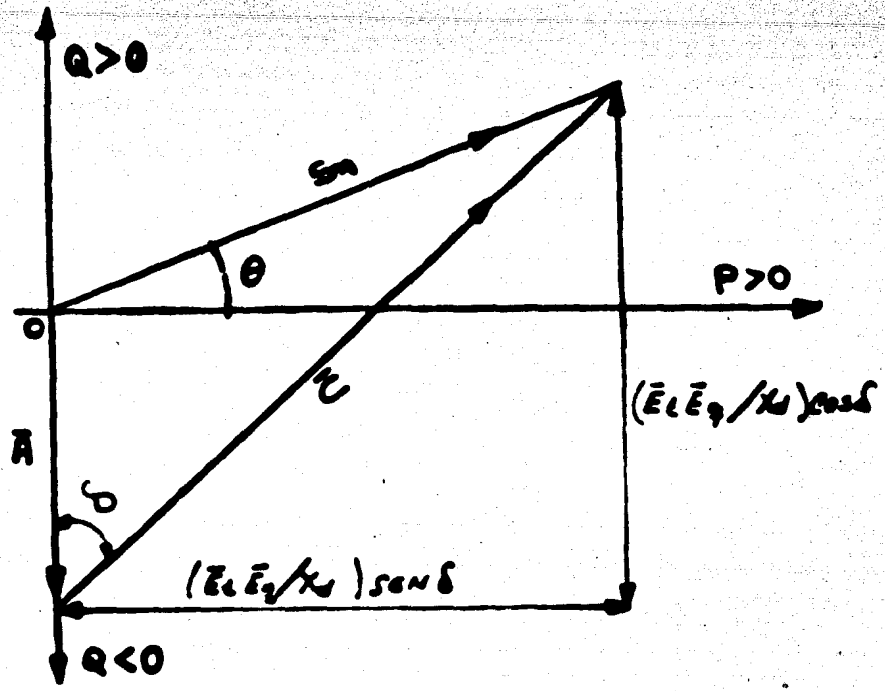


Fig. IV-1. Representación gráfica de los fasores \vec{A} y \vec{C} sobre el diagrama circular para una máquina síncrona de rotor cilíndrico.

De esta última expresión se deduce que P toma el valor de la parte real de la ecuación y Q la parte imaginaria, por lo tanto:

$$P = \frac{E_t E_q}{X_d} \sin \delta \dots\dots\dots(IV-3)$$

$$Q = \frac{E_t E_q}{X_d} \cos \delta - \frac{E_t^2}{X_d} \dots\dots\dots(IV-4)$$

En las ecuaciones (IV-3) y (IV-4) se ve claramente que tanto la potencia activa como la potencia reactiva dependen del valor que tome nuestro ángulo de po-

tencia, así como de la excitación que tenga la máquina ya que el voltaje terminal de nuestra máquina es considerado como un voltaje constante por encontrarse conectado a un BUS INFINITO.

BUS INFINITO es aquel bus que tiene una reactancia -cero y en el cual la tensión y la frecuencia permanecen constantes independientemente de la carga que alimenta.

De la ecuación (IV-3) nos damos cuenta que la potencia activa máxima positiva que nos puede dar la máquina será cuando $\delta = \pi/2$

$$P_{\max (+)} = \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q}{X_d} = \bar{C} \text{ ----- (IV-5)}$$

De la misma ecuación (IV-3) nos podemos también dar cuenta que la potencia activa máxima negativa que nos puede proporcionar dicha máquina será cuando -- nuestro ángulo de potencia sea de 270°

$$P_{\max (-)} = - \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q}{X_d} = - \bar{C} \text{ ----- (IV-6)}$$

De la ecuación (IV-4) podemos ver que la potencia reactiva máxima positiva que la máquina nos entrega será cuando nuestro ángulo de potencia sea de 0°

$$Q_{\max (+)} = \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q}{X_d} - \frac{\bar{E}_t^2}{X_d} = \bar{C} - \bar{A} \text{ -----(IV-7)}$$

Refiriéndonos nuevamente a la ecuación (IV-4) podemos notar que la potencia reactiva máxima negativa la obtendremos cuando nuestro ángulo de potencia sea de 180°

$$Q_{\max (-)} = - \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q}{X_d} - \frac{\bar{E}_t^2}{X_d} = - \bar{C} - \bar{A} \text{ -----(IV-8)}$$

Una vez obtenidas las potencias activas y reactivas máximas tanto en su forma positiva como negativamente pasaremos a representarlas en el diagrama circular.

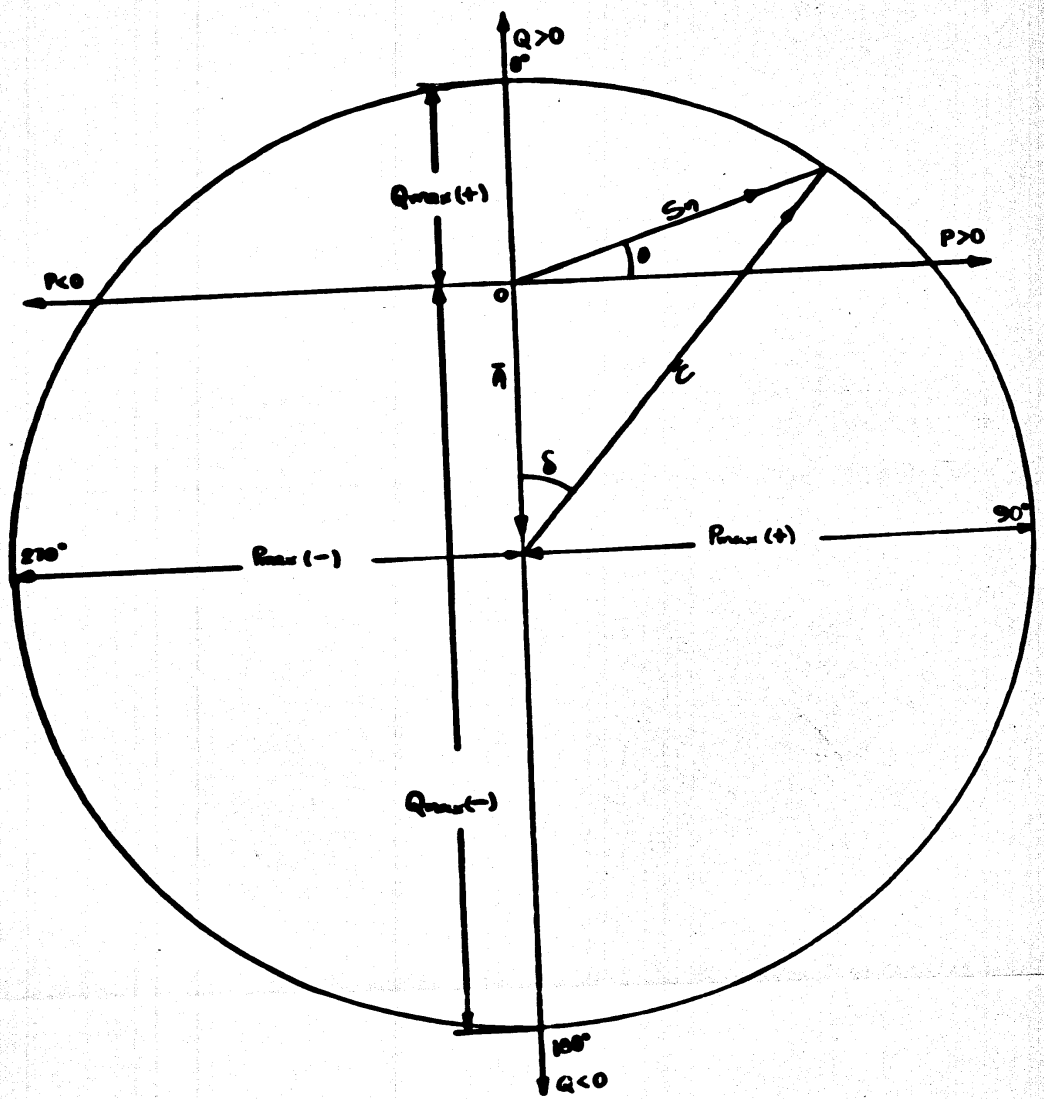


FIG. IV-2 Representación de las potencias activas y reactivas máximas para un generador síncrono de rotor cilíndrico.

Para darnos mayor cuenta como varían las potencias activa y reactiva con respecto al ángulo de potencia δ graficaremos la curva que describe cada potencia con respecto a dicho ángulo.

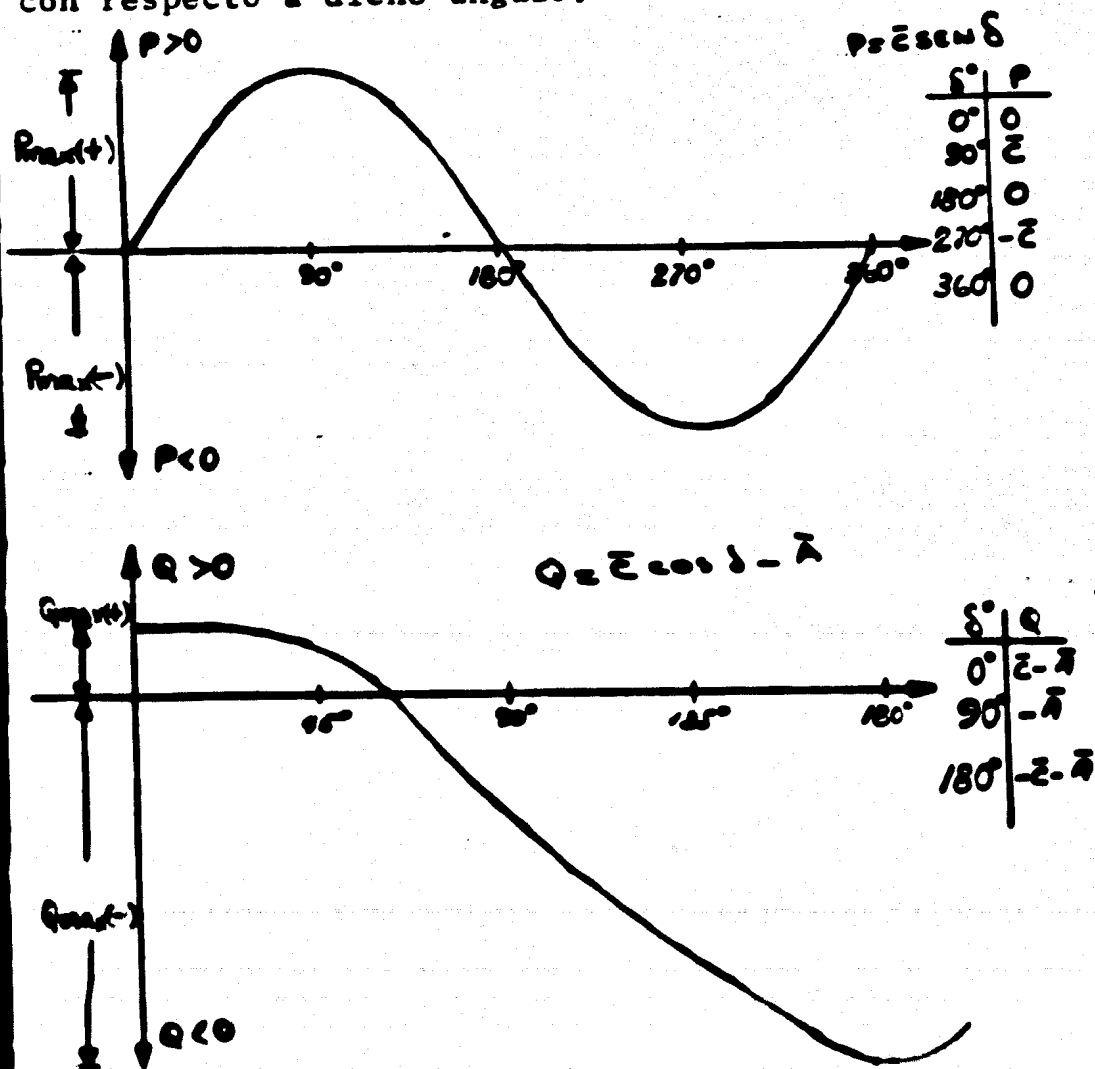


Fig. IV-3 Gráficas de las potencias activa y reactiva en función del ángulo de potencia δ para un generador síncrono de rotor cilíndrico.

CONSTRUCCION Y ANALISIS DEL DIAGRAMA DE CAPABILIDAD PARA UNA MAQUINA SINCRONA DE ROTOR CILINDRICO.

Para conocer el diagrama de capacidad o límite técnico de la máquina síncrona de rotor cilíndrico, haremos uso de los valores \bar{A} y \bar{C} obtenidos anteriormente, los cuales se graficarán para diferentes valores del ángulo de potencia ϕ

Sabemos que en el diseño de la máquina síncrona existen limitaciones que establecen la capacidad para la que fue diseñada, es debido a este motivo que las potencias activas y reactivas máximas representadas en nuestro diagrama circular se encuentran todavía sometidas a dos límites térmicos, que son, los de campo y de armadura, estos límites nos indican cuales son -- los valores máximos reales que una máquina síncrona nos puede proporcionar en potencia ya sea activa o reactiva sin que sean dañados los devanados de campo y de armadura, estas limitaciones de la máquina pueden conocerse mediante pruebas en cada uno de sus -- componentes; en una máquina síncrona el límite térmico estará determinado por el valor que toma la corriente nominal (I_n) para las condiciones de operación en estado permanente sin tomar en cuenta variaciones transitorias.

La diferencia que existe entre el diagrama circular y el diagrama de capacidad es precisamente en las limitaciones térmicas que existen en los devanados --

de campo y de armadura.

En la figura (IV-4), nos damos cuenta que la potencia limitada por la armadura sigue la trayectoria circular con radio igual al módulo de la potencia aparente nominal S_n (que generalmente se escoge el valor de 1 p.u.) con centro en el origen del plano coordenado (P-Q.)

La potencia limitada por el campo sigue la trayectoria circular con radio igual al módulo del fasor \bar{C} y con centro donde termina el fasor \bar{A} .

En la misma figura nos podemos dar cuenta que del punto nominal de operación (P_n) hacia la izquierda vemos que la potencia entregada por la máquina se encuentra limitada por las condiciones térmicas del campo aunque la armadura se encuentre en condiciones de entregarnos mas potencia.

De la figura (IV-5) nos podemos dar cuenta que cuando nuestro ángulo de potencia δ obtenga el valor de cero grados en ese momento tendremos la potencia reactiva máxima positiva; o sea.

$$Q_{\max} (+) = \bar{C} - \bar{A} \text{ ----- (IV-9)}$$

Como la ecuación IV-9 es idéntica a la ecuación IV-7 entonces podemos decir que nuestra máquina síncrona de rotor cilíndrico es capaz de proporcionarnos la

potencia reactiva máxima positiva sin que sea dañado el devanado del campo.

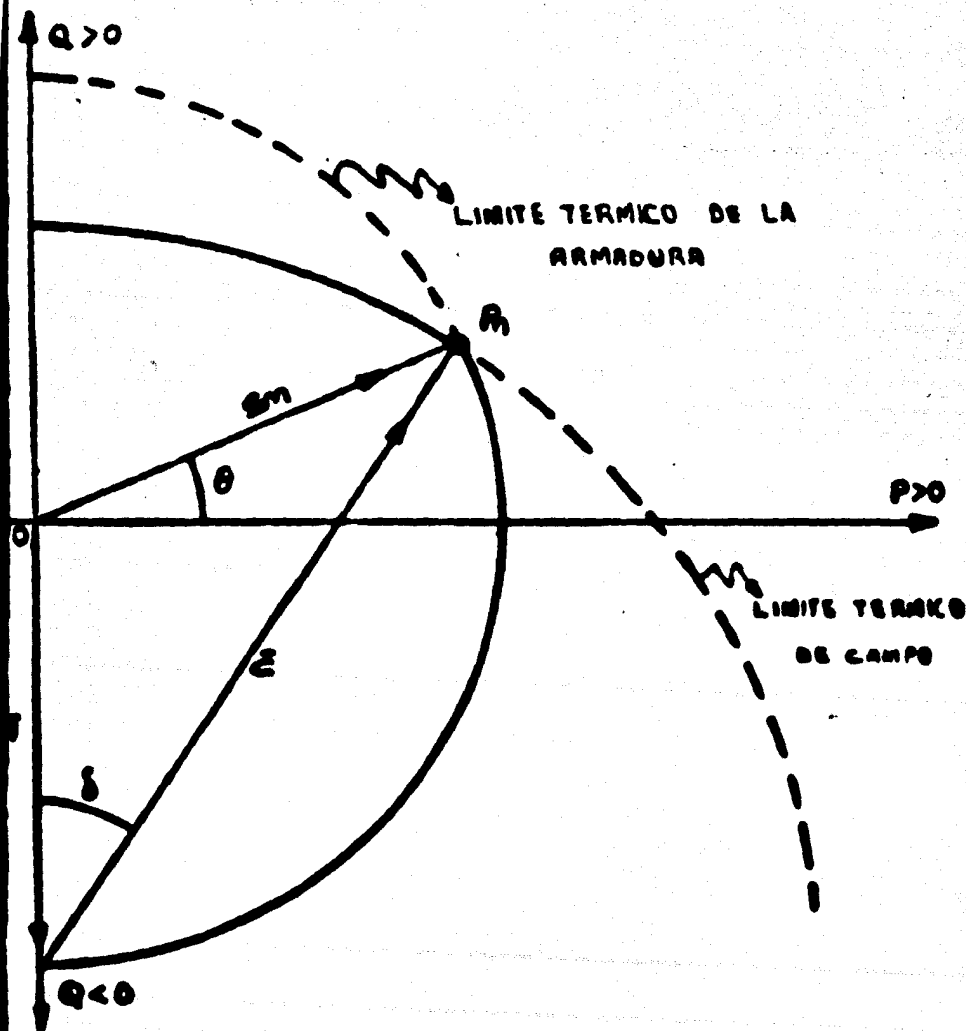


Fig. IV-4 Diagrama de capacidad de una máquina síncrona de rotor cilíndrico.

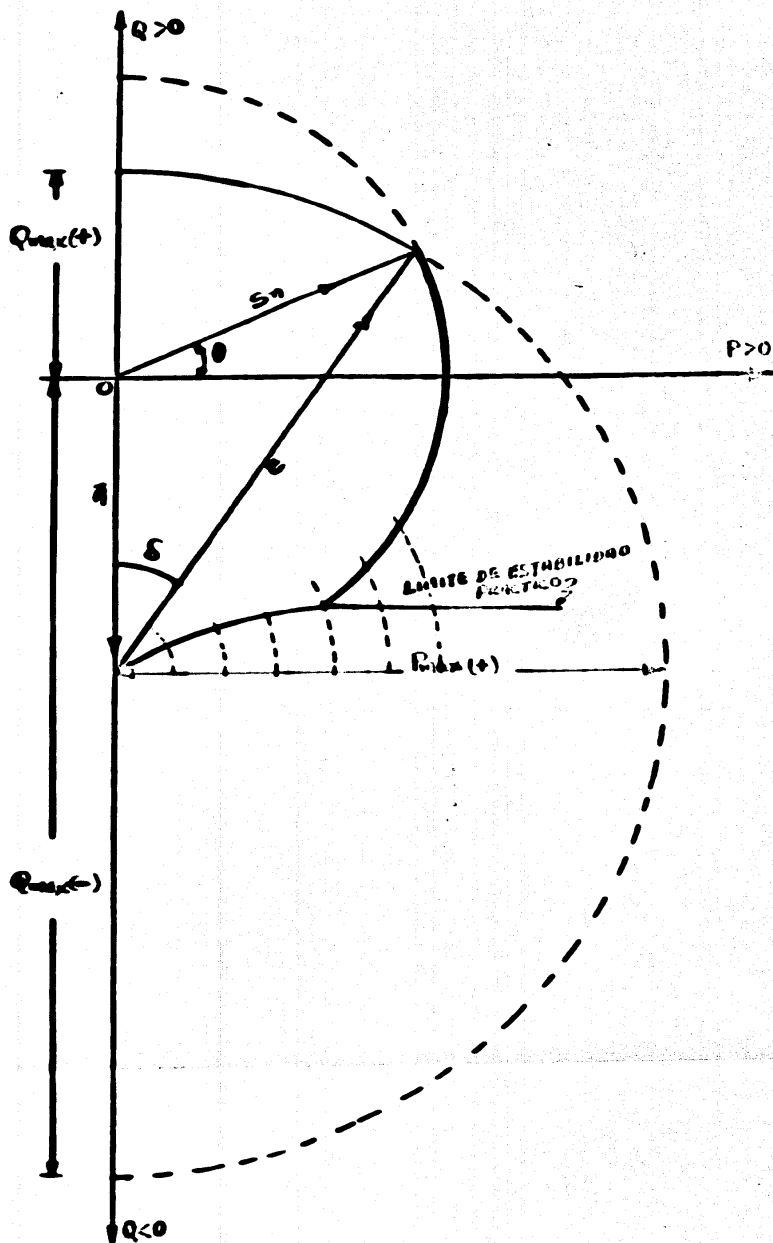


FIG. IV-5 Representación de las $P_{m\acute{a}x}$. y $Q_{m\acute{a}x}$ en el Diagrama de capacidad para una máquina síncrona de rotor cilíndrico.

De la misma figura también podemos darnos cuenta que la máquina no es capaz de entregarnos la potencia -- reactiva máxima negativa debido a que para este caso la máquina se encuentra determinada por el límite -- térmico de la armadura.

Refiriéndonos nuevamente a la figura IV-5 podemos -- ver que del punto Pn a la derecha la potencia máxima activa positiva que nos puede entregar la máquina se encuentra limitada por las características térmicas de la armadura, en base a esto nos podemos dar cuenta que para un punto mayor a la potencia nominal -- (Sn) se correrá el riesgo de dañar la armadura de -- nuestra máquina en estudio.

Como en este estudio trabajamos a la máquina síncrona como generador es debido a este motivo que no nos interesa lo que sucede cuando la potencia activa es máxima negativa.

A manera de conclusión para este análisis de la máquina síncrona de rotor cilíndrico podemos decir que una máquina de las características anteriores NO es capaz de entregarnos las potencias activas máxima ni la potencia reactiva máxima negativa, ya que estas -- potencias se encuentran limitadas o determinadas --- realmente hasta el valor nominal de la potencia -- aparente (Sn).

OBTENCION DE LAS POTENCIAS ACTIVAS Y REACTIVAS MAXIMAS PARA UNA MAQUINA SINCRONA DE ROTOR DE POLOS SALIENTES.

Nuevamente para la obtención de las potencias activas y reactivas máximas, en este caso para una máquina síncrona de rotor de polos salientes partiremos de la ecuación I-15 que nos determina la potencia terminal para un generador síncrono de esas características dicha ecuación es:

$$S = \frac{\bar{E}_t^2}{2} \operatorname{sen} 2\delta \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) + \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q}{X_d} \operatorname{sen} \delta +$$

$$+ j \left[\left(\frac{\bar{E}_t \bar{E}_q}{X_d} \cos \delta + \frac{\bar{E}_t^2}{2} \cos 2\delta \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) - \right.$$

$$\left. - \frac{\bar{E}_t^2}{2} \left(\frac{X_d + X_q}{X_d X_q} \right) \right]$$

De la ecuación anterior tenemos que el valor de la potencia activa toma el valor de la parte real ya que como se dijo anteriormente $S = P + jQ$

$$P = \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q}{X_d} \operatorname{sen} \delta + \frac{\bar{E}_t^2}{2} \operatorname{sen} 2\delta \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \dots$$

.....(IV-10)

La ecuación IV-10 que nos determina la potencia activa para una máquina síncrona de rotor de polos salientes difiere de la ecuación IV-3 que nos determina la potencia activa para una máquina síncrona de rotor cilíndrico por el término adicional que no es función de la excitación de campo de la máquina; este término es llamado comunmente PAR DE RELUCTANCIA ó componente de la potencia de reluctancia del eje directo y del eje en cuadratura.

Es conveniente recalcar que si $X_d = X_q$ este término adicional que no es función de la excitación es igual a cero, como puede verse en la ecuación IV-3.

En la ecuación IV-10 se ve claro que una máquina síncrona de rotor de polos salientes es capaz de desarrollar potencia activa aun sin aplicarle excitación de campo dicho de otra manera cuando $E_q = 0$, mas adelante lo demostraremos gráficamente valiéndonos del diagrama de capacidad para dicha máquina.

Por otra parte podemos decir que como la parte real de la ecuación I-15 perteneció a la potencia activa, lógico es pensar que la parte imaginaria corresponda a la potencia reactiva por lo que:

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q}{X_d} \cos \delta + \frac{\bar{E}_t^2}{2} \cos 2\delta \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) - \\
 &= \frac{\bar{E}_t^2}{2} \left(\frac{X_d + X_q}{X_d X_q} \right) \text{-----(IV-11)}
 \end{aligned}$$

Para una máquina síncrona de rotor de polos salientes se dijo en el capítulo I que los valores de los factores A, B y C toman los siguientes valores.

$$-j \frac{\bar{E}_t^2}{2} \left(\frac{X_d + X_q}{X_d X_q} \right) = \bar{A} e^{-j\pi/2} = -j \bar{A}$$

$$\frac{\bar{E}_t^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) (\sin 2\delta + j \cos 2\delta) =$$

$$\bar{B} e^{j(\pi/2 - 2\delta)} = \bar{B} (\sin 2\delta + j \cos 2\delta)$$

$$\frac{\bar{E}_t \bar{E}_q}{X_d} (\sin \delta + j \cos \delta) = (\sin \delta + j \cos \delta) \bar{C}$$

Bajo estas condiciones anteriores podemos representar a la potencia aparente como:

$$S = \bar{A} e^{-j\pi/2} + \bar{B} e^{j(\pi/2 - 2\delta)} + \bar{C} (\sin \delta + j \cos \delta)$$

Desarrollando y agrupando términos tenemos que:

$$\begin{aligned}
 S = & \bar{B} \sin 2\delta + \bar{C} \sin \delta + j (-\bar{A} + \bar{B} \cos 2\delta + \\
 & + \bar{C} \cos \delta)
 \end{aligned}$$

Por lo que las potencias activa y reactiva en forma de fasores toman las siguientes formas.

$$P = \bar{B} \operatorname{sen} 2\delta + \bar{C} \operatorname{sen} \delta \text{ ----- (IV-12)}$$

$$Q = -\bar{A} + \bar{B} \cos 2\delta + \bar{C} \cos \delta \text{ ----- (IV-13)}$$

En la ecuación IV-13 se ve claro que obtendremos la potencia reactiva máxima positiva cuando nuestro ángulo de potencia δ tome el valor de cero grados.

$$Q_{\max (+)} = -\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} \text{ ----- (IV-14)}$$

Por lo que respecta a la potencia reactiva máxima negativa la obtendremos cuando nuestro ángulo de potencia adquiera el valor de 180°

$$Q_{\max (-)} = -\bar{A} + \bar{B} - \bar{C} \text{ ----- (IV-15)}$$

Para obtener la potencia activa máxima se tendrá que derivar la ecuación IV-12 con respecto al ángulo de potencia δ ya que no se ve, ha simple vista el valor del ángulo que maximise dicha ecuación.

$$\frac{dP}{d\delta} = P_{\text{máxima}} = 0$$

$$P_{\max} = 2 \bar{B} \cos 2\delta + \bar{C} \cos \delta = 0 \text{ -----(IV-16)}$$

además sabemos que:

$$\cos^2 \delta = \frac{1 + \cos 2\delta}{2}$$

por lo tanto:

$$\cos 2\delta = 2\cos^2 \delta - 1$$

sustituyendo esta última expresión en la ecuación IV-16 nos queda

$$2 \bar{B} (2 \cos^2 \delta - 1) + \bar{C} \cos \delta = 0$$

$$4 \bar{B} \cos^2 \delta - 2 \bar{B} + \bar{C} \cos \delta = 0$$

$$4 \bar{B} \cos^2 \delta + \bar{C} \cos \delta - 2 \bar{B} = 0$$

Esta última expresión es de la forma de la ecuación cuadrática.

$$ax^2 + bx + c = 0$$

Donde

$$a = 4 \bar{B}$$

$$b = \bar{C}$$

$$c = -2\bar{B}$$

cuya solución es:

$$\cos \delta = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

sustituyendo valores tenemos:

$$\cos \delta = \frac{-\bar{C} \pm \sqrt{\bar{C}^2 + 32\bar{B}^2}}{8\bar{B}} \text{ ----- (N° 17)}$$

De esta última expresión obtendremos dos valores de $\cos \delta$ uno positivo y otro negativo, lógico es pensar que el que nos interesa es el valor positivo ya que estamos trabajando a la máquina síncrona como generador y el valor de $\cos \delta$ negativo corresponde a la máquina síncrona trabajando como motor.

Una vez conocidas las potencias máximas negativas y positiva pasaremos a representarla en el diagrama circular no pudiendo representar en este diagrama la potencia activa máxima ya que tendríamos que conocer el valor numérico del ángulo de potencia δ , mas adelante lo encontraremos en un ejemplo numérico.

Refiriéndonos nuevamente a los valores de los fasores A, B y C para aplicarlos en la construcción de nuestro diagrama circular tenemos que es conveniente hacer notar que el fasor A sigue siendo constante y

en la dirección negativa del eje Q con un módulo --
igual a $\frac{E_f}{2}$, por lo que respecta al fasor B tenemos
que cambia su dirección de acuerdo al ángulo de po--
tencia δ , permaneciendo también su módulo constan--
te, por último el fasor C tiene las mismas caracte--
rísticas de la máquina síncrona de rotor cilíndrico
solo que para este caso su centro de giro no se en--
cuentra donde termina el fasor A, ya que su centro -
de giro se encuentra donde termina el fasor B y lo -
que es más importante es que este fasor C no se va
a encontrar fijo, dicho de otra manera el fasor C se
moverá sobre el círculo que describa el fasor B con--
forme el ángulo de potencia varíe.

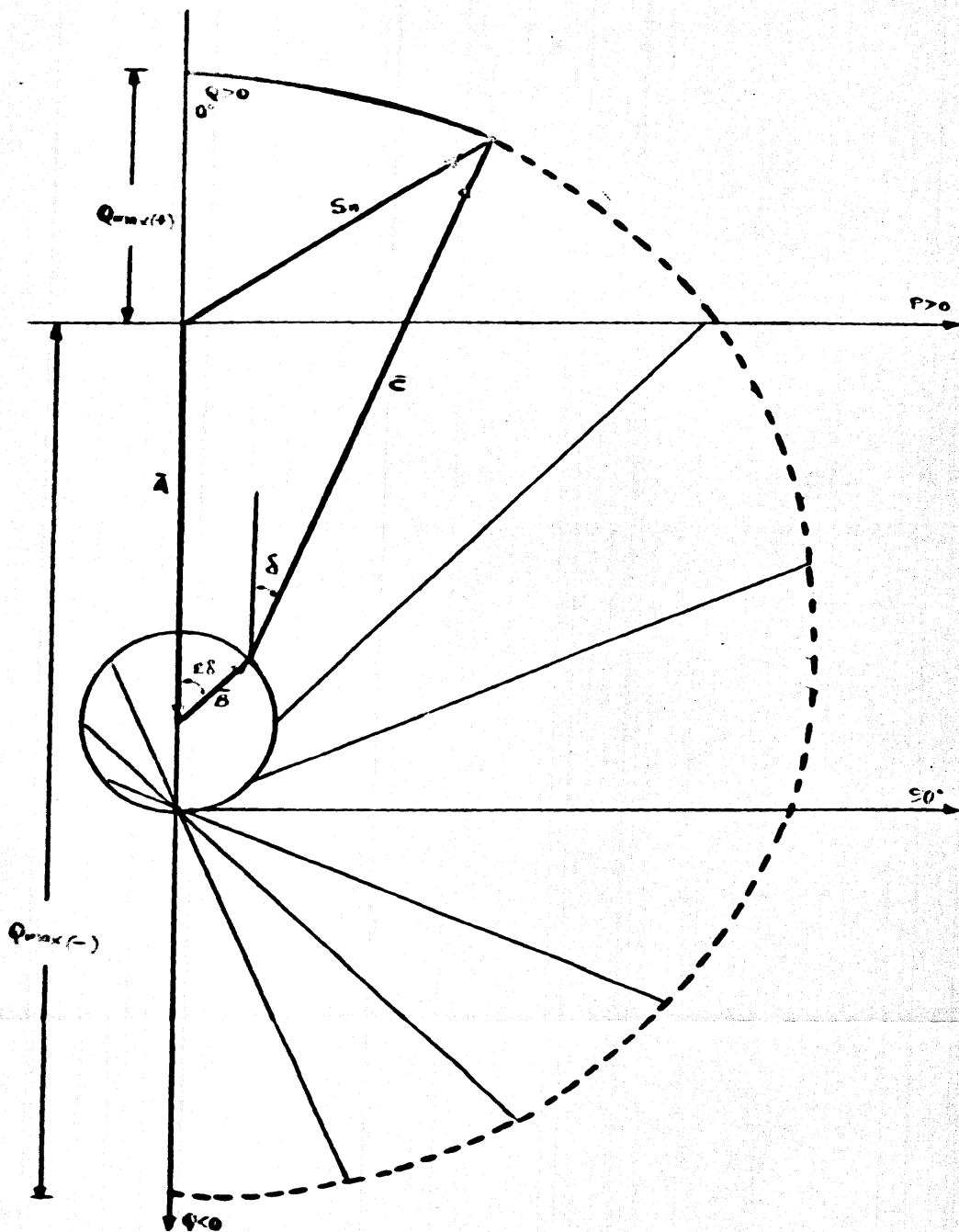


FIG. IV-6 Representación de las potencias reactivas máximas positiva y negativa para un generador síncrono de rotor de polos salientes.

Para darnos mayor cuenta como varían las potencias activa y reactiva con respecto al ángulo de potencia δ , graficaremos la curva que describe cada potencia con respecto a dicho ángulo.

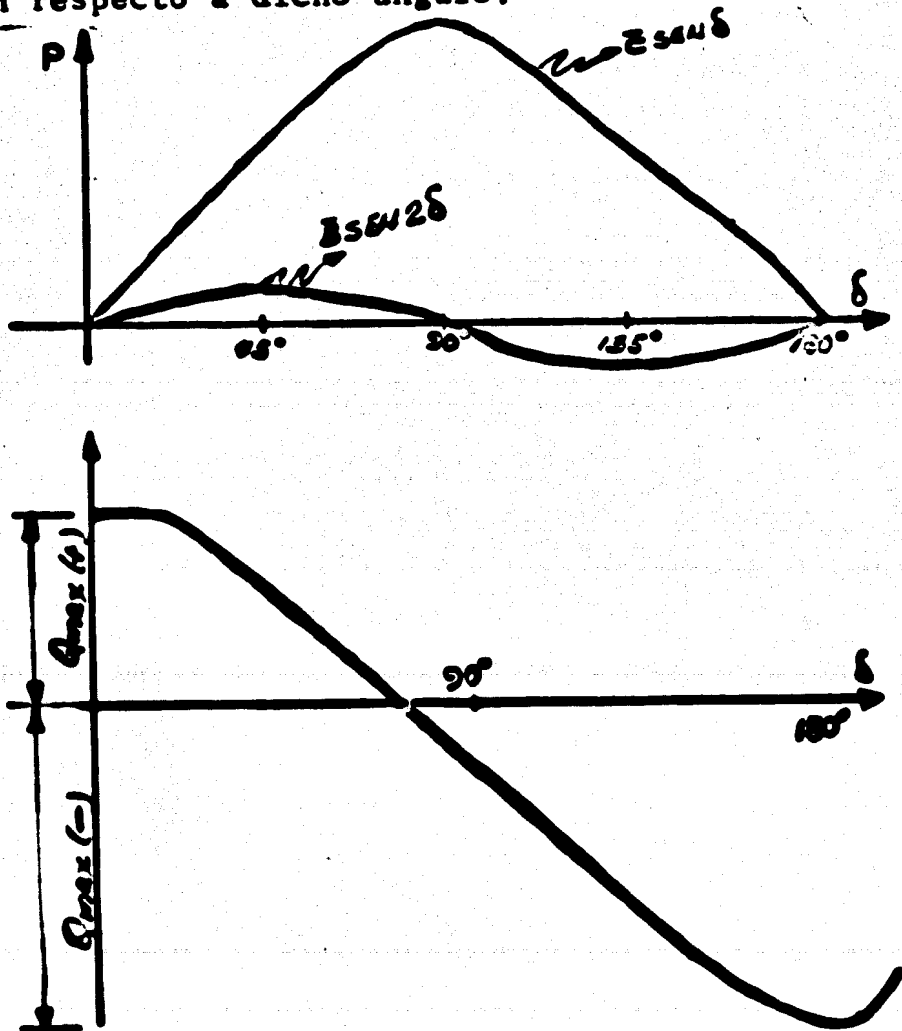


Fig. IV-7 Gráficas de las potencias activa y reactiva en función del ángulo de potencia para un generador síncrono de rotor de polos salientes.

INSTRUCCION Y ANALISIS DEL DIAGRAMA DE CAPABILIDAD PARA UNA MAQUINA SINCRONA DE ROTOR DE POLOS SALIEN- S.

Para la construcción del diagrama de capacidad de máquina síncrona de rotor de polos salientes se usará nuevamente de los valores de los fasores A, B y C encontrados anteriormente, los cuales se graficarán para diferentes valores del ángulo de potencia δ .

En la construcción del diagrama de capacidad para máquina síncrona de rotor cilíndrico se mencionaron los límites térmicos de armadura y de campo, esas limitaciones térmicas son también aplicables a máquina síncrona de rotor de polos salientes, debido de otra manera las potencias reactivas representadas en la Fig. IV-6 se encuentran todavía sometidas a los límites térmicos de campo y de armadura. Para darnos mayor cuenta de dicho fenómeno se construye el diagrama de capacidad para dicha máquina en la Fig. IV-8.

En la Fig. IV-8 nos damos cuenta que la potencia limitada por la armadura sigue una trayectoria circular con un radio igual al módulo de la potencia nominal (que generalmente se escoge 1 p.u.), el centro de la circunferencia se encuentra en el origen del plano coordenado P-Q.

La potencia limitada por el campo NO sigue una trayectoria circular, ya que como se dijo anteriormente a manera de recordatorio tenemos que el fasor C que es el que describe la potencia limitada por el campo no se encuentra fijo si no que se mueve sobre el círculo que describe el fasor B conforme el ángulo de potencia ϕ varie.

Es conveniente hacer notar que la parte de 1 a 2 en la Fig. IV-8 es trazada de acuerdo al límite de estabilidad para dicha máquina.

Refiriéndonos nuevamente a la Fig. IV-8 podemos ver que cuando nuestro ángulo de potencia sea igual a cento grados, en ese momento obtendremos de la máquina la potencia reactiva máxima positiva cuyo valor viene determinado por:

$$Q_{\text{máx}} (+) = \bar{C} + \bar{B} - \bar{A} \text{ ----- (IV-18)}$$

Como podemos notar la ecuación IV-18 es idéntica con la ecuación IV-14 por lo cual estamos en el derecho de afirmar que nuestra máquina síncrona de rotor de polos salientes SI es capaz de proporcionarnos la potencia reactiva máxima positiva sin que sea dañado el devanado del campo.

De la misma figura IV-8 vemos que la máquina no es

capaz de entregarnos la potencia reactiva máxima negativa debido a que para este caso la máquina se encuentra limitada ó determinada por el límite térmico de la armadura.

También en dicha figura podemos apreciar que del punto P_n a la derecha la potencia máxima activa positiva que nos puede entregar la máquina se encuentra -- limitada por las características térmicas de armadura.

A manera de conclusión podemos decir que una máquina síncrona de rotor de polos salientes NO es capaz de entregarnos las potencias activa máxima positiva ni la reactiva máxima negativa ya que nuevamente estas potencias se encuentran determinadas o limitadas --- realmente hasta el valor nominal de la potencia aparente (S_n)

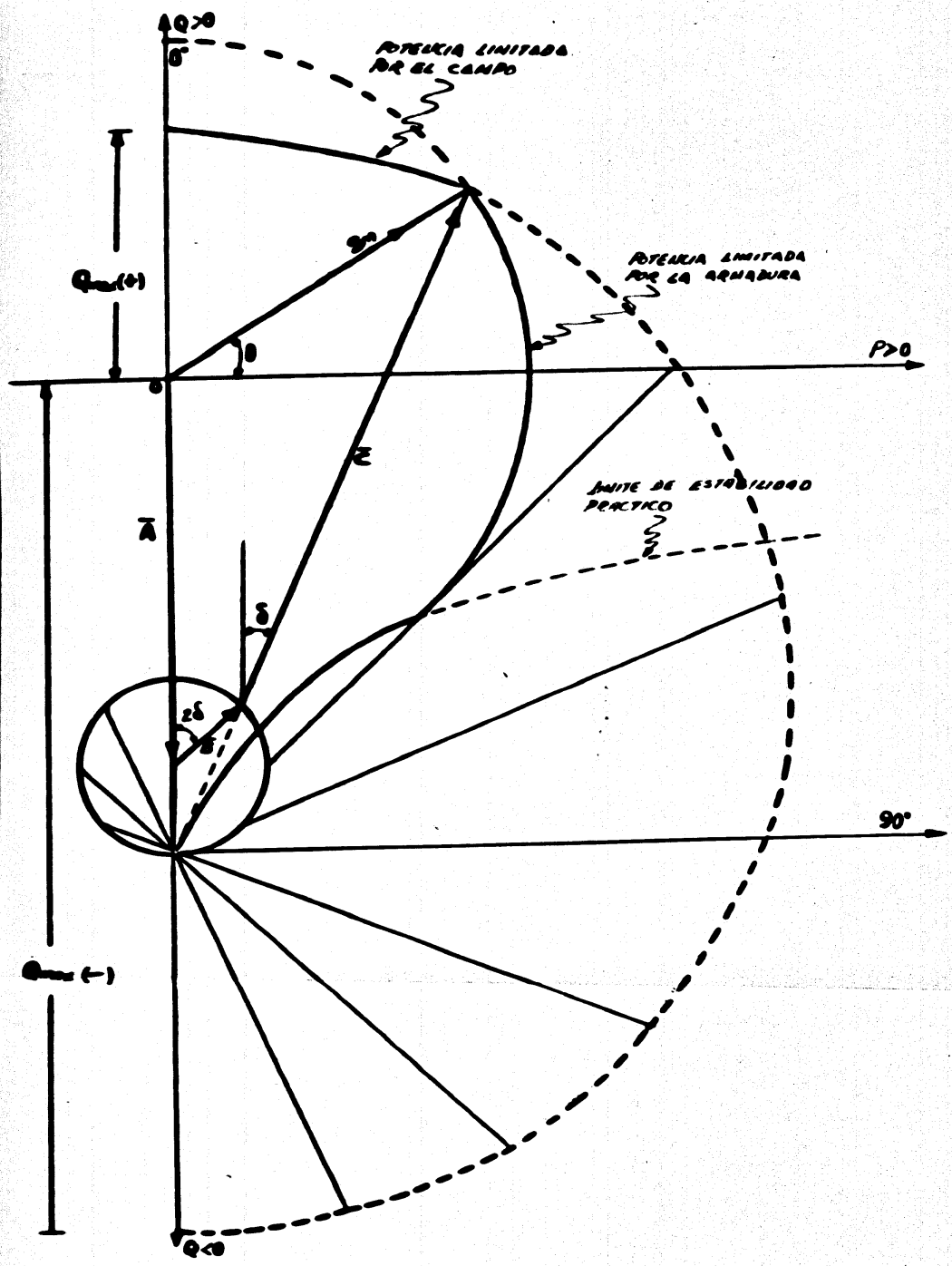


Fig. IV-8 Diagrama de capacidad para una máquina síncrona de rotor de polos salientes.

ELIMINACION DE LA EXCITACION PARA UN GENERADOR SINCRONO DE ROTOR DE POLOS SALIENTES

En la sección anterior se comentó que una máquina -- síncrona de rotor de polos salientes nos entregaría potencia aún sin aplicarle excitación de campo o sea cuando $E_q = 0$, en esta sección nos dedicaremos a hacer un análisis desde el punto de vista gráfico para darnos mayor cuenta de dicho funcionamiento.

Para comenzar este análisis nos basaremos en la Fig. IV-9 o sea en el diagrama de capacidad de una má-- quina síncrona de rotor de polos salientes y partiremos de la condición inicial de que nuestra máquina - se encuentra trabajando en su punto nominal (P_n), bajo estas co ndiciones, nuestro primer paso a la solución de este problema es bajar un poco la excitación de campo hasta un nuevo valor E_1 , en la dirección - de la recta $P_n - E_5$; seguidamente se vuelve a bajar la excitación hasta un nuevo valor E_2 y así sucesivamente hasta un valor E_5 que es el punto de intersección de dicha recta con la curva que nos determina - el límite térmico de la armadura además este punto viene a hacer el punto máximo de excitación que podamos tener sobre la recta $P_n - E_5$, por lo expuesto - anteriormente nos podemos dar cuenta que un punto -- afuera de esta intersección y sobre la dicha línea -

os ocasionaría problemas debido a que nos encontramos fuera del margen del límite térmico de la armadura.

Como el propósito que nosotros buscamos es que el $\cos \phi = 0$ entonces tomamos la alternativa de seguir disminuyendo el módulo del fasor C por medio de la línea $E_6, E_7, E_8, E_9, E_{10}$ si nuestro campo de armadura lo permite llegamos a este último punto cuando nuestro ángulo de potencia δ sume 45°

Una vez concluido con la primera parte de este análisis lo que nos queda por comprobar es que si efectivamente la máquina síncrona de rotor de polos salientes se encuentra desarrollando potencia activa.

En el punto E_{10} notamos que $E_q = 0$ por lo tanto

$$= \frac{\bar{E}_t}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \sin 2\delta + \frac{\bar{E}_t \bar{E}_q}{X_d} \sin \delta$$

lo que es también

$$= \bar{B} \sin 2\delta + \bar{C} \sin \delta$$

por lo tanto

$$= \frac{\bar{E}_t}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) = \bar{B}$$

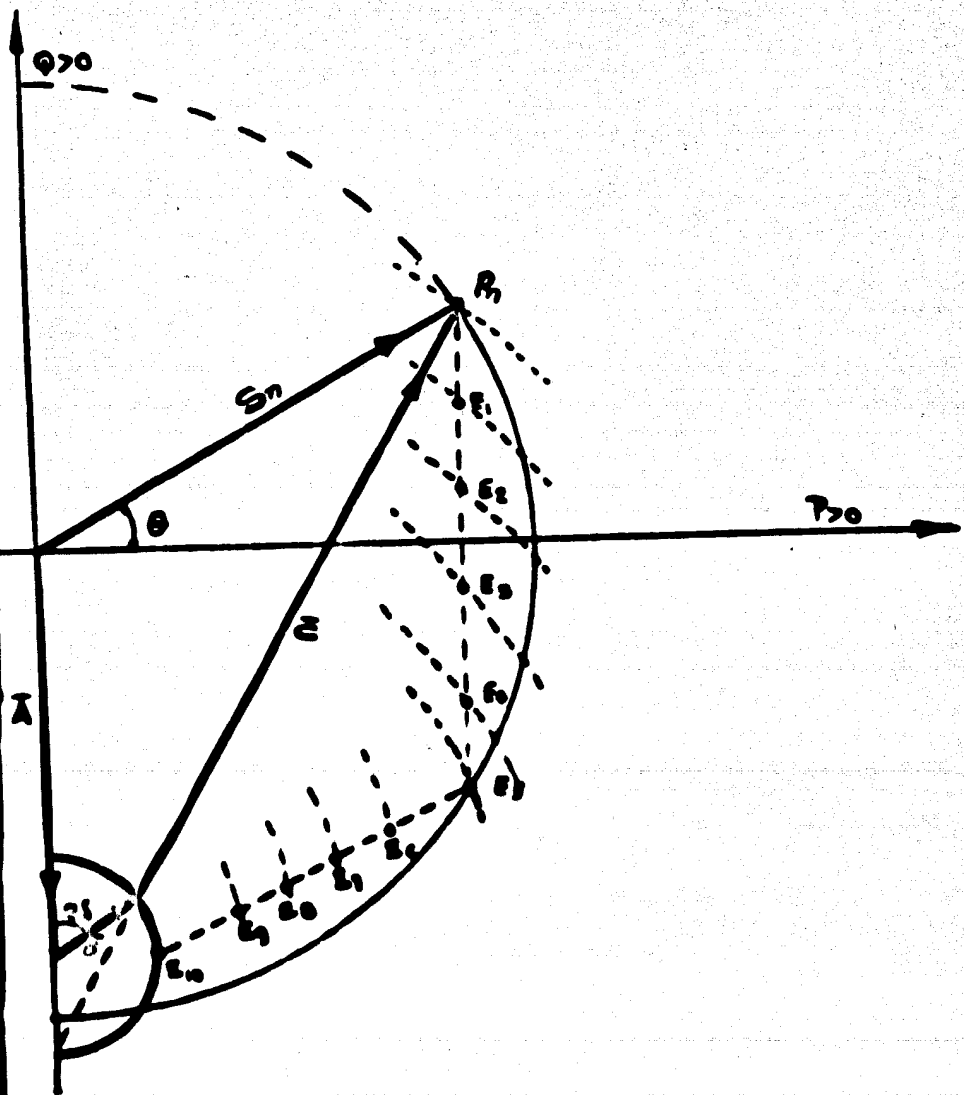


Fig. IV-9 Diagrama de capacidad para una máquina síncrona de rotor de polos salientes donde muestra los pasos a seguir para quitar la excitación de campo.

Por lo que estamos en el derecho de decir que cuando a una máquina síncrona de rotor de polos salientes - se le quita la excitación de campo ($E_q = 0$) dicha máquina se encuentra en condiciones de entregarnos potencia activa que en valor viene a ser igual al módulo de B

También de la misma figura IV-9 nos podemos dar cuenta que cuando la excitación de campo se hace igual con cero, la potencia reactiva de dicha máquina toma como valor

$$Q = - \frac{\bar{E}_t^2}{2} \left(\frac{X_d + X_q}{X_d X_q} \right)$$

$$Q = - \bar{A}$$

Para el caso de una máquina síncrona de rotor cilíndrico, lo que se tendría cuando la excitación de campo fuera igual con cero, sería simplemente pura potencia reactiva, ya que para este tipo de máquinas - el valor del fasor B es igual con cero. Dicho de otra manera, en una máquina síncrona de rotor de polos salientes existirá potencia activa cuando la excitación de campo fuese igual con cero debido a que las variaciones del entrehierro generan un par llamado comunmente "PAR DE RELUCTANCIA" y este par es producido por la diferencia que existen en las reluctancias de dicha máquina.

INFLUENCIA DEL MEDIO REFRIGERANTE EN LA CAPABILIDAD DE UNA MAQUINA.

Debido a la circulación de corriente en los devanados tanto de campo como de armadura, se crea calentamiento en dichos devanados.

Debido a lo anterior es necesario limitar la circulación de corriente y así evitar aumentos de temperatura producida por la circulación de estas corrientes que pudiesen cortar la vida útil de los devanados y por consiguiente la de la máquina. Por lo tanto si nosotros enfriamos a estos devanados así como las partes de mayor temperatura, podemos hacer que circule una mayor cantidad de corriente por dichos devanados aumentando con esto que la máquina obtenga mayor capacidad.

La máquina síncrona puede ser enfriada de diversas maneras ya sea haciendo circular aire fresco del medio ambiente a través de la máquina o por medio de circuito cerrado, con aire sin contaminación para proteger a la máquina.

Para generadores de alta capacidad o sea para mayores de 20MVA se emplea un sistema de enfriamiento a base de hidrógeno, debido a las grandes ventajas que presenta como son:

- a) No es un elemento caro.
- b) Es de baja densidad
- c) Alta conductividad térmica
- d) No hay desprendimiento de ozono, el cual daña los aislamientos.
- e) Alto coeficiente de transmisión de calor

Pero a la vez tiene como principal desventaja que mezclado en proporción de 5% a 75% con aire es altamente explosivo, por lo cual debe tomarse algunas precauciones al emplearlo.

Usando hidrógeno como refrigerante, se aumenta la capacidad de la máquina, como ejemplo citaremos algunas proporciones al aumentar la presión del hidrógeno.

Presión de hidrógeno (PSI)	Capacidad de la máquina (p.u.)
0.5	1.0
15.0	1.15
30.0	1.25

Existe también otra relación entre el enfriamiento, el factor de potencia y la relación de corto circuito.

Medio de enfriamiento	f.p.	R.C.C.
Hidrógeno	0.85	0.8
	0.90	0.64
Aire	0.85	0.5
	0.90	0.6

SOLUCIÓN A UN PROBLEMA PRACTICO DE UNA MAQUINA SIN- CRONA DE ROTOR DE POLOS SALIENTES PARA OBTENER SU -

DIAGRAMA CIRCULAR.

A continuación resolveremos un problema práctico para visualizar mejor los conceptos anteriormente expuestos para una máquina síncrona de rotor de polos salientes, ya que en la solución de éste problema se podrá observar donde y en que puntos las potencias activas y reactivas son máximas para las siguientes condiciones.

$$S_n = 200 \text{ MVA} = 1.0 \text{ (p.u.)}$$

$$V_n = 13.3 \text{ KV} = 1.0 \text{ (p.u.)}$$

$$X_q = 0.7 \text{ (p.u.)}$$

$$X_d = 1.35 \text{ (p.u.)}$$

$$E_t = 1.0 \text{ (p.u.)}$$

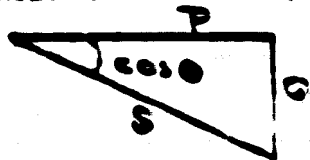
$$f.p = 0.9$$

Solución:

$$P = S_n \cos \theta$$

$$P = 1 (0.9) = 0.9 \text{ (p.u.)}$$

además conocemos que



por lo tanto

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(1)^2 - (0.9)^2} = \sqrt{0.19}$$

$$Q = 0.4358 \text{ (p.u.)}$$

para conocer el valor de los fasores A, B y C tenemos que

$$A = \bar{A} \angle -\pi/2$$

$$\bar{A} = \frac{\bar{E}_t^2}{2} \left(\frac{X_d + X_q}{X_d X_q} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1.35 + 0.7}{1.35 \times 0.7} \right)$$

$$\bar{A} = \frac{1}{2} \left(\frac{2.05}{0.945} \right) = 1.0846 \text{ (p.u.)}$$

$$A = 1.0846 \angle -\pi/2$$

$$B = \bar{B} \angle \pi/2 - 2\delta$$

$$\bar{B} = \frac{\bar{E}_t^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1.35 - 0.7}{1.35 \times 0.7} \right) =$$

$$\bar{B} = \frac{1}{2} \left(\frac{0.65}{0.945} \right) = 0.3439 \text{ (p.u.)}$$

$$B = 0.3439 \sqrt{\pi/2 - 2\delta}$$

Para conocer el valor de C tendremos que conocer y -
primero el ángulo de potencia δ

$$\text{Tang } \delta = \frac{P}{Q + \bar{A} + \bar{B}} = \frac{0.9}{0.4358 + 1.0846 + 0.3439}$$

$$\text{tang } \delta = 0.4827$$

$$\delta = 25.76^\circ$$

Es conveniente hacer notar que este valor del ángulo de potencia encontrado NO es el valor para el cual - nuestra potencia activa es máxima, ya que este valor del ángulo de potencia δ encontrado, solamente nos in dica a donde se encuentra dicho ángulo para las con- diciones iniciales dadas; una vez conocido el ángulo de potencia δ procederemos a encontrar el valor del fasor C

$$P = \bar{B} \text{ sen } 2\delta + \bar{C} \text{ sen } \delta$$

$$\bar{C} = \frac{P - \bar{B} \text{ sen } 2\delta}{\text{sen } \delta} = \frac{0.9 - 0.3439 \text{ sen } 51.52^\circ}{\text{sen } 25.76^\circ}$$

$$\bar{C} = \frac{0.6307}{0.4346}$$

$$\bar{C} = 1.4512 \text{ (p.u.)}$$

por lo tanto el valor de el voltaje de excitación -- será:

$$\bar{C} = \frac{\bar{E}_q \bar{E}_t}{X_d}$$

$$\bar{E}_q = \frac{\bar{C} X_d}{\bar{E}_t} = \frac{1.45 \times 1.35}{1} = 1.9591 \text{ (p.u.)}$$

Ya conociendo el módulo de los fasores A, B y C podemos conocer

$$Q_{\max (+)} = -\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} = -1.0846 + 0.3439 + 1.4512$$

$$Q_{\max (+)} = 0.7105 \text{ (p.u.)}$$

$$Q_{\max (-)} = -\bar{A} + \bar{B} - \bar{C} = -1.0846 + 0.3439 - 1.4512$$

$$Q_{\max (-)} = -2.1919$$

Por lo que respecta a la $P_{\max (+)}$ tendremos que hacer uso de la ecuación N-17, para así poder conocer el valor del ángulo de potencia δ que maximise a dicha ecuación.

$$\cos \delta = \frac{-\bar{C} \pm \sqrt{\bar{C}^2 + 32\bar{B}^2}}{8\bar{B}}$$

$$\cos \delta = \frac{-1.4512 \pm \sqrt{(1.4512)^2 + 32(0.3439)^2}}{8(0.3439)}$$

$$\cos \delta = \frac{-1.4512 \pm 2.4270}{2.7512}$$

Como se dijo anteriormente el valor de $\cos \delta$ que nos interesa es el valor con signo positivo

$$\cos \delta = 0.3546$$

$$\delta = 69.23^\circ$$

Por lo que:

$$\begin{aligned} \cos(\delta) &= \bar{B} \cos 2\delta + \bar{C} \cos \delta = 0.3439 \cos 138.46^\circ + \\ &+ 1.4512 \cos 69.23^\circ \end{aligned}$$

$$\cos(\delta) = -0.2574 + 0.5146 = 0.2576$$

A continuación tabularemos los valores de P, Q y S para diferentes valores del ángulo de potencia δ para posteriormente llevarlos al diagrama circular.

$$P = \bar{B} \sin 2\delta + \bar{C} \sin \delta$$

$$Q = -\bar{A} + \bar{B} \cos 2\delta + \bar{C} \cos \delta$$

δ°	P (P.M.)	δ°	Q (P.M.)
0	0	0	0.7105 $Q_{\max}(+)$
10	0.3695	10	0.6676
20	0.7173	20	0.5424
25.76	0.8983	25.76	0.4381
40	1.2714	40	0.0867
45	1.3700	45	-0.0585
50	1.4502	50	-0.2115
69.23	1.5848 $T_{\max}(+)$	69.23	-0.8274
80	1.5467	80	-1.1558
90	1.4512	90	-1.4285
100	1.3115	100	-1.6616
120	0.9589	120	-1.9821
140	0.5942	140	-2.1365
160	0.2753	160	-2.1848
180	0	180	-2.1919 $Q_{\max}(-)$

$S = P + j Q$ S°	S (P.U.)
0	$0 + j 0.7105$
10	$0.3695 + j 0.6676$
20	$0.7173 + j 0.5424$
25.76	$0.8983 + j 0.4381$
40	$1.2714 + j 0.0867$
45	$1.37 - j 0.0585$
50	$1.4502 - j 0.2115$
69.73	$1.5848 - j 0.8274$
80	$1.5467 - j 1.1558$
90	$1.4512 - j 1.4285$
100	$1.3115 - j 1.6616$
120	$0.9589 - j 1.9821$
140	$0.5942 - j 2.1365$
160	$0.2753 - j 2.1848$
180	$0 - j 2.1919$

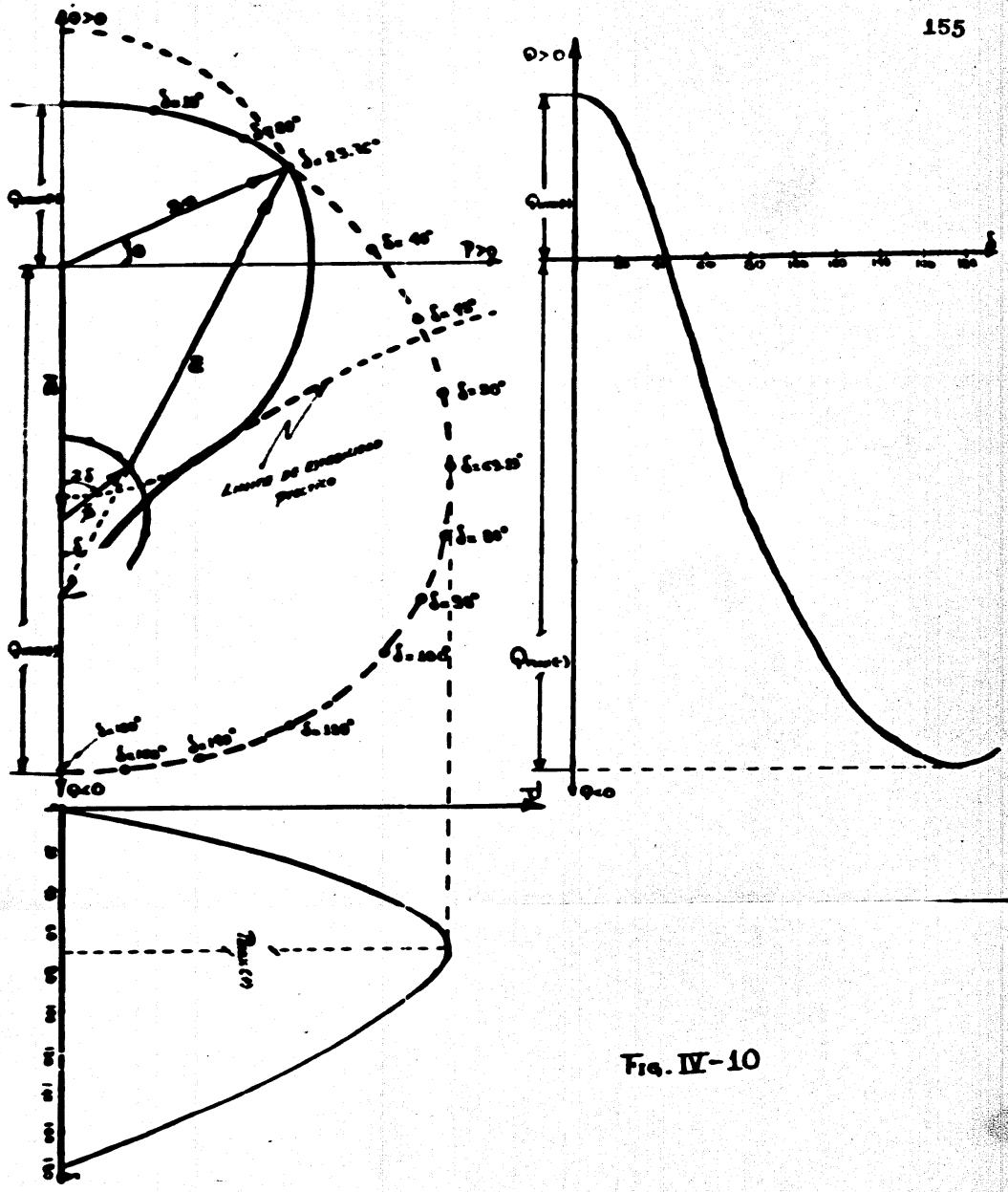


Fig. IV-10

I N D I C E

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

CAPITULO I. ANALISIS DE LA MAQUINA SINCRONA.

- La máquina síncrona
- Obtención de los parámetros de la máquina síncrona de rotor cilíndrico
 - a) Prueba de circuito abierto
 - b) Prueba de corto circuito
 - c) Relación de corto circuito
- Potencia terminal de un generador síncrono de rotor cilíndrico
- Diagrama P-Q ó circular para máquinas síncronas
- Obtención de los parámetros de la máquina síncrona de rotor de polos salientes
 - a) Prueba de deslizamiento
- Potencia terminal de un generador síncrono de rotor de polos salientes

CAPITULO II. ESTABILIDAD DE SISTEMAS

- Estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia
- Factores que afectan la estabilidad
- Límite de estabilidad en régimen permanente de la máquina síncrona
- Límite de estabilidad práctico para factores de potencia adelantado

- a) Para máquinas síncronas de rotor cilíndrico
- b) Para máquinas síncronas de rotor de polos salientes
- Diferencia entre límite de estabilidad y límite de potencia
- Estabilidad en régimen transitorio
- Ecuación de la oscilación
- Ecuación dinámica de la potencia
- Amortiguamiento propio de un sistema eléctrico

CAPITULO III.- CONTROL DE CARGA Y FRECUENCIA

- Justificación del control de la frecuencia
- Tipos de regulación
- Regulación primaria
- Características principales del regulador
- Estatismo
- Característica de generación
- Relación Carga-Frecuencia
- Estatismo y característica de generación de un sistema
- Reasignación de cambio de carga a diferentes unidades por medio de regulación primaria.

- Regulación secundaria.

CAPITULO IV CAPABILIDAD DE LAS MAQUINAS SINCRONAS DE ROTOR CILINDRICO Y DE POLOS SALIENTES.

- Obtención de las potencias Activas y Reactivas máximas para una máquina síncrona de rotor cilíndrico.
- Construcción y análisis del diagrama de ca pabilidad para una máquina síncrona de rotor cilíndrico.
- Obtención de las potencias Activas y Reactivas máximas para una máquina síncrona de rotor de polos salientes.
- Construcción y análisis del diagrama de ca pabilidad para una máquina síncrona de rotor de polos salientes.
- Eliminación de la excitación para un generador síncrono de rotor de polos salientes.
- Influencia del medio refrigerante en la -- capacidad de una máquina.
- Solución a un problema práctico de una máquina síncrona de rotor de polos salientes para obtener su diagrama circular.

B I B L I O G R A F I A

ELECTRICAL, TRANSMISSION AND DISTRIBUTION REFERENCE
BOOK
Central Station Engineer of the Westinghouse Electric
Corporation.
East Pittsburgh, Pennsylvania

ELECTRIC MACHINERY
W. P. Fitzgerald, Kingsley, Kusko
and C. Graw - Hill, Kogakusha

POWER SYSTEM STABILITY
W. A. G. Dimbark
John Wiley & Sons, Inc New York

MÁQUINAS SINCRONAS
Carlos Lucas Marín
Representaciones y Servicios de Ingeniería

REDES ELECTRICAS TOMO I
Jacinto Viqueira Landa
Representaciones y Servicios de Ingeniería

REDES ELECTRICAS TOMO II
Jacinto Viqueira Landa
Representaciones y Servicios de Ingeniería

MÁQUINAS ELECTROMAGNETICAS Y ELECTROMECHANICAS.
Leander W. Matsch
Representaciones -y Servicios de Ingeniería

ELECTRIC MACHINES
George T. Thaler
John Wiley & Sons, Inc. New York

POWER SYSTEM STABILITY

Selden B. Crary
John Wiley & Sons Inc New York

CENTRALES Y REDES ELECTRICAS

Buchhold - Happoldt
Editorial Labor, S.A.

ELEMENTOS OF POWER SYSTEM ANALYSIS

William D. Stevenso Jr
Mc. Graw-Hill Book Company Inc

THE CAPABILITY OF ALTERNATORS

R.W. Bruck H.K. Messerle
Proceedings Institutions Electrical Engineers 102-A
Papel No. 18795 Agosto 1955

MAQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA

Michael Liwschitz - Garik
Editorial C.E.C.S.A.

THE FUNDAMENTALS OF LOAD FREQUENCY CONTROL

W.M. Richardson
Leeds & Northrup Company

APUNTES DEL ING. SALVADOR CISNEROS CHAVEZ

APUNTES DEL ING. DAVID CANO SAUCEDO