



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería

## COMPARACION DEL COMPORTAMIENTO DE UNIDADES GENERADORAS SINCRONAS

# T E S I S

Que para obtener el título de:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

Presentan los Pasantes

|          |         |           |
|----------|---------|-----------|
| RUBEN    | HERRERO | ROMERO    |
| EULOGIO  | AVILES  | ORTEGA    |
| GILBERTO | NAVARRO | RODRIGUEZ |
| ALONSO   | PARRA   | LOMELI    |
| BRAULIO  | OCAMPO  | VARGAS    |
| JORGE    | ROMO    | SAUCEDO   |

México, D. F. 1961



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.

## INDICE

|                          |   |        |
|--------------------------|---|--------|
| ESTADISTICO              | REGULACION DE VELOCIDAD                 | PAG 1  |
| CONSTITUCION             | CLASIFICACION DE LA<br>MAQUINA SINCRONA | PAG 30 |
| ANALISIS                 | MAQUINA SINCRONA POTOP                  | PAG 58 |
| ISO Y POLOS SALIENTES    |   | PAG 78 |
| COMPARACION DE OPERACION | COMPORTAMIENTO                          |        |
| DE GENERADORES           | SINCRPOS                                | PAG 77 |

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

La Energía Eléctrica consumida generalmente es proporcionada por los generadores sincronicos. Por esta razón es de primordial importancia analizar el comportamiento y características de - operación de los generadores sincronicos ya que éstas difieren.

## CAPITULO I

### ESTADISTMO Y REGULACION DE VELOCIDAD:

En los sistemas de Energía Eléctrica es de vital importancia, mantener la frecuencia dentro de ciertos límites\_ lo más cercano posible a la frecuencia nominal de operación\_ para ello es indispensable contar con un dispositivo que cambie la velocidad del generador, de acuerdo a las variaciones de la carga y este es el regulador de Vel. o gobernador.

Cuando la carga aumenta, la máquina tiende a perder velocidad por lo cual disminuye la frecuencia y es entonces\_ cuando interviene el regulador el cual tiene como función -- abrir la válvula de control del primotor para poder satisfacer la potencia demandada por la carga, el caso contrario sucede cuando la carga disminuye la velocidad de la máquina, - aumenta incrementándose la frecuencia, el gobernador actúa - cerrando válvulas hasta igualar la potencia generada con la carga demandada.

Esto es  $P_{ci} \Delta P = P_G \Delta P$  por lo que la frecuencia resulta constante pero diferente de la inicial:

Existen dos tipos de características de Regulación -- formada por la unidad (GENERADOR Y PRIMOTOR) y su regulador\_ de velocidad, en su relación frecuencia (F) y potencia gene-

rada ( $P_G$ ); que a continuación se describen:

a).- La característica Astática es aquella que para una frecuencia dada, existe un número infinito de potencias su expresión gráfica es una línea horizontal.

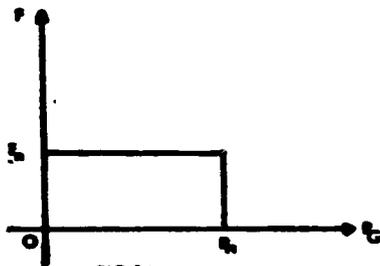


FIG.11

Donde:

$F$  = Frecuencia

$F_n$  = Frecuencia nominal

$P_n$  = Potencia nominal

$P_G$  = Potencia de Generación

Una unidad con característica Astática puede alimentar una carga, si ella es la única que genera. Dos o más unidades en paralelo con esta característica operarían en forma inestable.

b).- La característica Estática descendente es aquella en la que para cada frecuencia, existe un solo valor de potencia y su gráfica es una línea descendente.

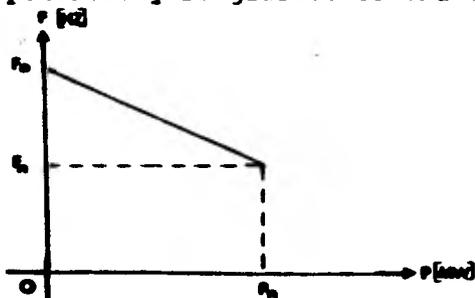


FIG.12

Donde:

$F_0$  = Frecuencia a carga cero

$F_n$  = Frecuencia a carga nominal

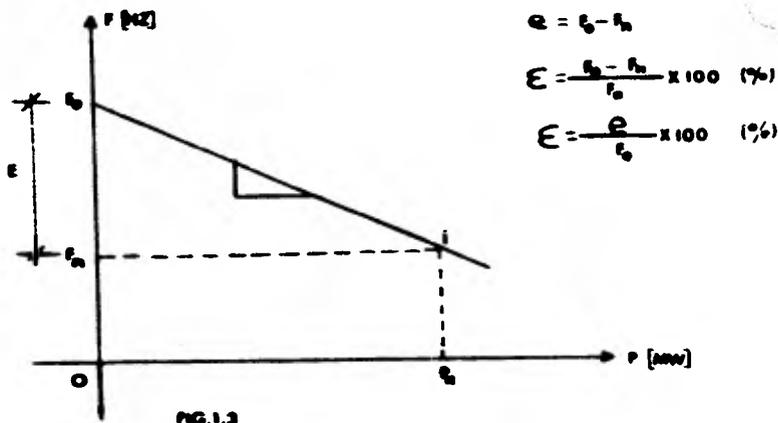
$P_n$  = Potencia Nominal

Para que en un sistema con varias unidades generadoras puedan trabajar en paralelo, es necesario que sus reguladores de velocidad, al actuar sobre los primotores, lo hagan siguiendo una característica estática descendente.

**Estatismo de la característica de regulación de velocidad:**

Se define como el cambio de velocidad angular que se tiene al pasar de carga cero al 100 por ciento de carga, o sea la variación de la frecuencia con respecto a la variación de la carga. El Estatismo identificado con la letra  $\epsilon$  se da en Hertz (Hz) o en Deci-Hertz (dHz), pero se acostumbra a darse más bien en por ciento (%) y la identificamos con la letra  $E$  llamada también como regulación

La siguiente figura nos ilustra mejor lo anteriormente expuesto



La característica de regulación se considera como una línea recta: aunque dista mucho de serlo, y en realidad es una sucesión de líneas, de pequeñas líneas casi rectas pero de diferentes pendientes.

Sin embargo para los estudios ordinarios de operación es perfectamente permisible considerar la característica como línea recta y evidentemente descendiente, esto es, con pendiente negativa.

Por lo anterior definimos que la característica de generación  $N_G = \frac{\Delta P}{\Delta F}$  como el inverso de la pendiente de la curva.

Donde la pendiente  $S = \frac{\Delta F}{\Delta P} \therefore N = \frac{1}{S} = S'$

$$N_G = \frac{\Delta P}{\Delta F} = \frac{P_n}{E P_n} \frac{MW}{Hz}$$

$P_n$  = Potencia Nominal

$E$  = Estatista de la Unidad en (p.u.)

$P_n$  = Frecuencia nominal

$N_G$  = Característica de Generación.

La Característica de generación  $N_G$  nos define la característica de potencia que aporta la máquina gobernada por el regulador de velocidad por cada décimo de ciclo de varia-

ción de la potencia.

Operación de máquinas en Paralelo.

En un sistema interconectado, cada máquina tiene una característica de regulación, por tanto, tiene su propia característica de generación y la característica de generación de todo el sistema, es la suma de todas las características de generación de todas las máquinas del sistema.

$$N_{GS} = N_{G1} + N_{G2} + N_{G3} + \dots + N_{GN}$$

Lo anterior se deduce de lo siguiente:

Sabemos que la potencia generada por un sistema, en operación de máquinas paralelas, es la suma de las potencias.

$$P_S = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad \text{ó} \quad \Delta P_S = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P_n \quad \text{y}$$

$$F_S = F_1 = F_2 = F_n \quad \text{ó} \quad \Delta F_S = \Delta F_1 = \Delta F_2 = \dots = \Delta F_n$$

Tenemos que:

$$\frac{\Delta P_S}{\Delta F_S} = \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P_n}{\Delta F_S}$$

$$N_S = \frac{\Delta P_1}{\Delta F_S} + \frac{\Delta P_2}{\Delta F_S} + \dots + \frac{\Delta P_n}{\Delta F_S} \quad \text{Pero } \Delta F_S = \Delta F_1 = \Delta F_2 = \dots = \Delta F_n$$

$$\therefore N_S = \frac{\Delta P_1}{\Delta F_1} + \frac{\Delta P_2}{\Delta F_2} + \dots + \frac{\Delta P_n}{\Delta F_n} = N_1 + N_2 + \dots + N_n$$

Para tener una idea más clara de lo antes expuesto -- analizaremos los siguientes ejemplos:

Ejemp. Un sistema S formado por dos áreas A y A', -  
sufre un aumento de carga en el área A, esta área está forma  
da por dos unidades a y a'.

El área A' es de tamaño semejante a la área A, pero\_  
no importa lo que suceda en sus unidades.

Para facilitar la exposición, se ha indicado que el -  
aumento de carga ocurre en el area A, sin embargo en la prác\_  
tica sólo se advierte el aumento de carga, pero no se conoce  
el lugar en que se presente (el equipo de control es el encar\_  
gado de averiguar ese lugar).

La magnitud del aumento de carga  $\Delta P_c$  o simplemente -  
 $\Delta c = 3 \text{ MW}$ .

Se quiere saber la característica de generación de ca  
da una de las unidades, así como el incremento de potencia -  
de cada unidad y del sistema.

Los datos y valores obtenidos se dan en la siguiente -  
tabla.

| U/A | Pn | Pi | E | NG    | $\Delta P$ | $\Delta F$ |
|-----|----|----|---|-------|------------|------------|
|     | MW | MW | % | MW/Hz | MW         | HZ         |
| a   | 5  | 3  | 6 | 1.39  | 0.6        | 0.4        |
| a'  | 10 | 4  | 6 | 2.78  | 1.1        | 0.4        |
| A   | 15 | 7  | - | 4.17  | 1.7        | 0.4        |
| A'  | 10 | 6  | 5 | 3.33  | 1.3        | 0.4        |
| S   | 25 | 13 | - | 7.50  | 3.0        | 0.4        |

En la Tabulación anterior los encabezados expresan:

U/A = Unidad generadora o Area

Pn = La potencia Nominal ó máxima de las unidades, Areas y sistema en (MW).

Pi = La potencia inicial (anterior al cambio de carga de -- las unidades, Areas y sistema en (MW).

E = Estatismo de las unidades a, a' y del Area A' en (%)

N = Característica de generación de las unidades, Areas o sistema en (MW / HZ).

$\Delta P$  = Cambio de potencia de la carga en el sistema ( $\Delta P$ ) y el cambio de generación por unidades y Area en (MW).

$\Delta F$  = Cambio en la frecuencia, o sea la diferencia entre el valor de frecuencia inicial y el que produjo cuando -- las unidades generaron la potencia que la carga demandó.

Aplicando la Ec.  $N_G = \frac{P_n}{EF_n}$ , obtenemos la característica de generación de cada unidad.

$$N_{G_a} = \frac{5}{60 \times 0.06} = 1.39 \frac{\text{MW}}{\text{HZ}} \quad N_{G_a'} = \frac{10}{60 \times 0.06} = 2.78 \frac{\text{MW}}{\text{HZ}}$$

La característica de Generación del Area A, es la suma de las características de sus unidades.

$$N_{GA} = N_{G_a} + N_{G_a'} = 1.39 + 2.78 = 4.17 \frac{\text{MW}}{\text{HZ}}$$

Para el Area A' tenemos:

$$N_{GA'} = \frac{10}{60 \times 0.05} = 3.33 \frac{\text{MW}}{\text{HZ}}$$

Por lo cual tenemos que:

$$N_{GS} = N_{GA} + N_{GA'} = 4.17 + 3.33 = 7.5 \frac{\text{MW}}{\text{HZ}}$$

Ahora encontremos el decremento de frecuencia  $\Delta F$

$$\text{Donde: } \Delta F = \frac{\Delta P_S}{N_{GS}} ; \Delta F = \frac{3}{7.5} = 0.4 \text{ HZ.}$$

Por otro lado, según la ec.  $N_G = \frac{\Delta P}{\Delta F}$  obtenemos que

$$\Delta P = \Delta F \cdot N_G \text{ por lo que}$$

$$\Delta P_a = N_{G_a} \times \Delta F = 1.39 \times 0.4 = 0.558 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{a'} = 2.78 \times 0.4 = 1.111 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{A'} = 3.33 \times 0.4 = 1.333 \text{ MW}$$

El incremento de potencia total será:

$$\Delta P_S = \Delta P_A + \Delta P_{A'} + \Delta P_{A''} = 3 \text{ MW}$$

Una vez que el aumento de carga en el sistema ha sido satisfecho por ambas áreas A y A', repartándose la potencia de acuerdo con sus propios estatismos, el sistema recupera - su condición de estado estable, y la aceleración vuelve a -- ser cero pero la frecuencia es inferior a la inicial.

Unidad (a)  $P_a = P_i + \Delta P_a = 3 + 0.6 = 3.6 \text{ (MW)}$

Unidad a'  $P_{a'} = P_i + \Delta P_{a'} = 4 + 1.111 = 5.1 \text{ (MW)}$

Area (A)  $P_A = P_a + P_{a'} = 7 + 1.7 = 8.7 \text{ (MW)}$

Area (A')  $P_{A'} = P_{iA'} + \Delta P_{A'} = 6 + 1.333 = 7.3 \text{ (MW)}$

Sistema (S)  $P_S = P_A + P_{A'} = 8.7 + 7.3 = 16 \text{ (MW)}$

y la frecuencia final.

$$F_f = F_i - \Delta F = 60 - 0.4 = 59.6 \text{ (HZ)}$$

Estos resultados son obtenidos considerando que la - carga permanece invariable en el lapso de tiempo en el que - restablece el sistema.

Los resultados anteriores los podemos ver gráficamente en la siguiente figura (I.4)

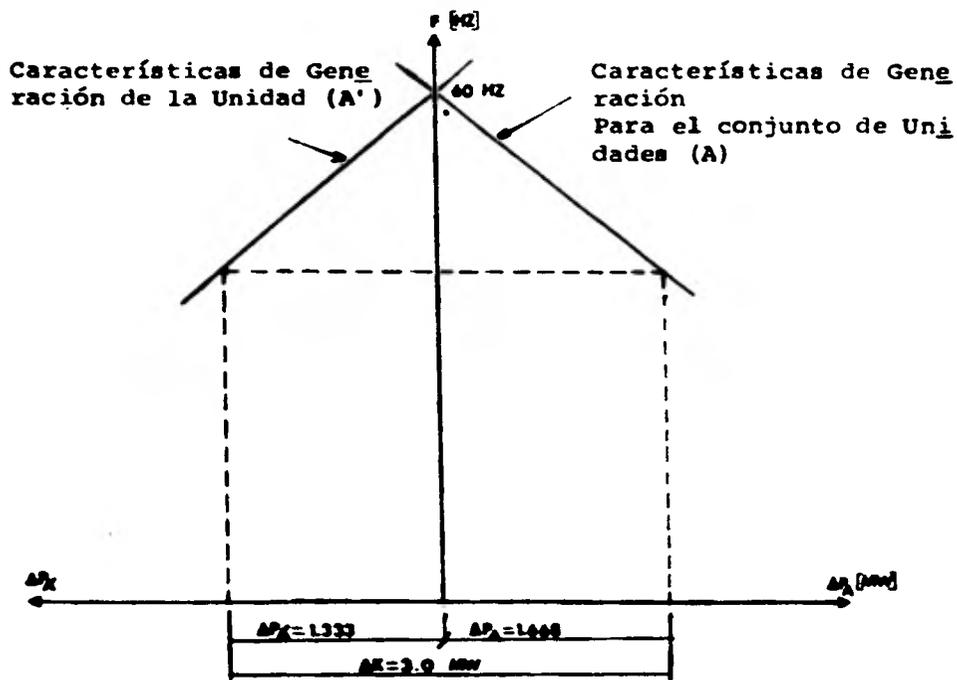


FIG. 1.4

Como se ha dicho antes, el regulador de velocidad aumenta la generación de la unidad, cuando la frecuencia del sistema al que esta conectado baja y esto ocurre cuando la carga aumenta.

Si la frecuencia del sistema sube, el regulador reduce consecuentemente la generación, a esto se le llama la acción de regulación de la unidad, que la integra el regulador de velocidad, el primotor y el generador de la unidad. Co--

munmente se le llama acción involuntaria de la unidad pero - en realidad es el control proporcional de la unidad cuyo valor es la característica de generación  $N_G$  mencionada anteriormente y que se mide en MW/Hz.

Para recuperar la frecuencia se requiere de un dispositivo adicional que el propio regulador tiene. La acción - de este dispositivo llamado comunmente acelerador, seguida - por la acción del regulador de velocidad forman el control - de reposición que fundamentalmente es un control de tipo integral.

Así como se describe la acción del regulador por la - característica de estatismo paralelamente así misma. Hacia\_ arriba cuando se necesita aumentar generación y hacia abajo\_ cuando se necesita reducirla. Es importante distinguir las\_ dos acciones la del regulador de velocidad y la del acelerador que es un dispositivo añadido al regulador propiamente - dicho y que aparentemente forma parte del regulador.

El regulador de velocidad cambia la generación como - consecuencia de un cambio de la frecuencia.

El acelerador cambia la generación sin haber habido - algún cambio de frecuencia previo. Sin embargo cada acción\_

del acelerador es seguida por una acción contraria del regulador de velocidad, si el acelerador aumenta generación la frecuencia sube y el regulador consecuentemente baja generación.

A cada acción del regulador le sigue una correspondiente del regulador contraria a la que efectuó el acelerador. Esta acción combinada de ambos elementos ya sea en uno o varios generadores del sistema regresan la frecuencia a su valor inicial y las unidades que no están bajo control regresan a su condición inicial.

Para comprender más claramente como funciona la acción combinada del regulador de velocidad propiamente dicho y del acelerador es necesario examinar esta operación cuando se trata de un sistema aislado es decir un generador y una carga.

Debe tenerse presente que el estatismo de la unidad E y característica de generación de la unidad N describen el mismo fenómeno pero se expresan usando diferentes conceptos y unidades de medición.

Para comprender más claramente lo explicado anterior-

mente nos ayudaremos de la fig.

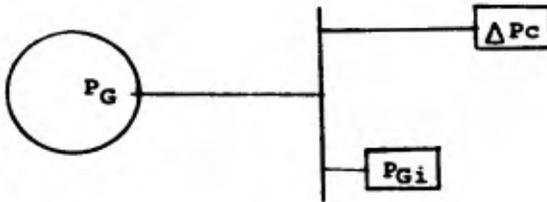


FIG.1.5

Donde:

$P_G$  = Potencia Generada.

$P_{Gi}$  = Potencia Generada Inicialmente

$\Delta P_c$  = Incremento de la carga

$P_{ci}$  = Potencia de la carga inicial

$N_1$  = Característica de Generación uno

$N_2$  = Característica de Generación dos

$N_3$  = Característica de Generación tres.

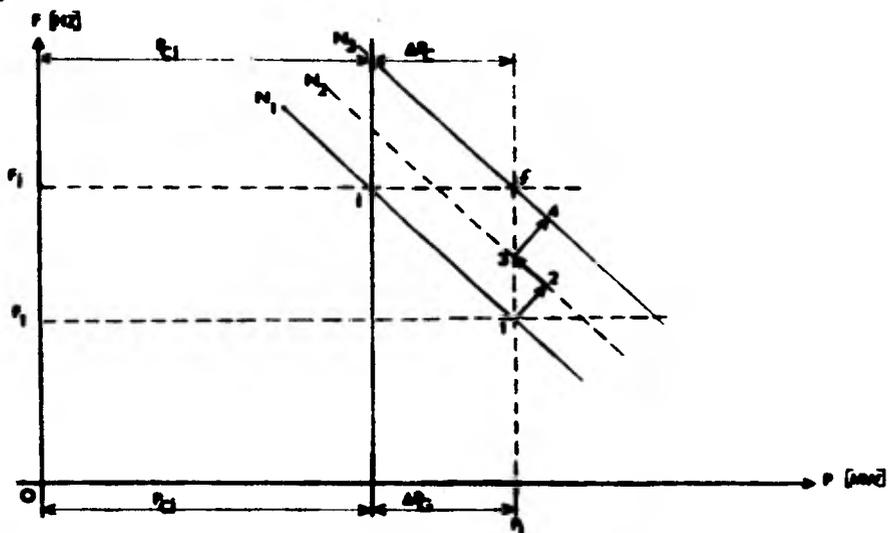


FIG.1.6

Inicialmente la frecuencia  $P_i$  corresponde a la potencia  $P_i$ .

$$P_i = P_{ci} = P_{Gi}$$

Al experimentar la carga un aumento de potencia  $\Delta P_c$  y la Unidad generadora, por medio del regulador de velocidad - produjo un aumento de generación  $\Delta P_G$  y cuando éstos son iguales:

$$\Delta P_c = \Delta P_G$$

Se volverá a obtener el equilibrio, es decir, una nueva condición estable del sistema, en que su aceleración sea - cero pero su frecuencia se haya reducido en una magnitud  $\Delta F$ .

$$P_{c1} = P_{ci} + \Delta P_c$$

$$P_{G1} = P_{Gi} + \Delta P_G$$

$$F_1 = F_i - \Delta F$$

Resumiendo:

$$P_i = P_{ci} = P_{Gi} \quad (MW)$$

$$\Delta P = \Delta P_c = \Delta P_G \quad (MW)$$

$$P_1 = P_i + \Delta P \quad (MW)$$

A partir de este estado estable y suponiendo que las actuaciones del acelerador y del regulador de Vel, propiamente dicho no se sobreponen sino que una se inicia cuando la - otra termina.

Estando en el punto 1 de la F.1.6 el acelerador actúa\_ durante un tiempo finito es decir que durante este tiempo aumentó generación y consecuentemente aumentó frecuencia hasta el punto 2 de la F. 1.6 En ese momento cesa la acción del acelerador, y a partir del punto 2 el regulador toma la acción\_ al darse cuenta que la Vel. está aumentando (puesto que la - generación en este momento es mayor que la carga) arriba de la que había en el punto 1 y procede a reducirla y para esto disminuye la generación pero como el único camino que sigue\_ es el de la característica de generación, se alcanza nuevamente el equilibrio en el punto tres en el que  $P_{G1} = P_{C1}$  nuevamente la aceleración es cero pero la frecuencia aun no\_ ha alcanzado el valor de la frecuencia inicial ( $F_i$ ) por lo - tanto vuelve a actuar el acelerador aumentando generación y - al mismo tiempo la frecuencia hasta alcanzar el punto (4) de la F. 1.6 en ese instante el regulador entra en acción al darse cuenta que la velocidad está aumentando arriba del punto 3 y disminuye generación siguiendo el camino de la caracte-- rística de generación y así sucesivamente hasta que la -----  $P_f = P_i$

Los reguladores de la velocidad actúan cada vez que - sus sensibilidades respectivas reconocen un cambio de veloci\_

dad.

El control por su parte trata siempre de conservar la frecuencia prefijada.

**Ejemplo No. 2.**

A continuación analizaremos otro ejemplo en el que se verá lo que sucede si sale de operación la unidad A' y se queda suministrando toda la carga, la unidad A compuesta por las unidades a y a' en la siguiente tabla se dan los datos y resultados obtenidos.

| U/A | Fu | Pi | E | N     | $\Delta P$   | $\Delta F$   |
|-----|----|----|---|-------|--------------|--------------|
|     | MW | MW | % | MW/HZ | MW           | HZ           |
| a   | 5  | 4  | 6 | 1.39  | $\Delta Ga$  | $\Delta Fa$  |
| a'  | 10 | 4  | 6 | 2.78  | $\Delta Ga'$ | $\Delta Fa'$ |
| A   | 15 | 8  | - | 4.17  | -            | $\Delta FA$  |
| A'  | 10 | 6  | 5 | 3.33  | $\Delta GA$  | $\Delta FA'$ |
| S   | 25 | 14 | - | 7.50  | $\Delta K=G$ | $\Delta FS$  |

Tabla 1-2

Determinaremos ahora cada una de las incógnitas de -- acuerdo con la ec.

$$N_G = \frac{P_n}{E} = \frac{P_n}{E_{Fn}}$$

Sustituyendo valores.

$$N_{Ga} = \frac{5}{0.06 \times 60} = 1.39 \text{ MW/HZ}$$

$$N_{Ga'} = \frac{10}{0.06 \times 60} = 2.78 \text{ MW/HZ}$$

$$N_{GA} = ( \Sigma ) = N_{Ga} + N_{Ga'} = 4.17 \text{ MW/HZ}$$

Para obtener el decremento de la frecuencia.

$$\Delta F = \frac{\Delta P}{N_{GA}}$$

$$\Delta F = \frac{6}{4.17}$$

$$\Delta F = 1.44 \text{ (Hz)}$$

Con este dato encontramos el incremento de generación de cada una de las máquinas.

$$\Delta Pa = \Delta F \times N_{Ga} = 1.44 \times 1.39 = 2 \text{ MW}$$

$$\Delta Pa' = \Delta F \times N_{Ga'} = 1.44 \times 2.78 = 4 \text{ MW}$$

$$\text{Vemos que: } \Delta P = \Delta Pa + \Delta Pa' = 2 + 4 = 6 \text{ MW}$$

La máquina (a) está entregando una potencia activa -- inicial  $P_i = 4 \text{ MW}$  y de acuerdo al incremento de potencia calculado:

$$P_i + \Delta Pa = 4 + 2 = 6 \text{ MW}$$

de lo anterior podemos ver que la unidad (a) no podrá aportar el incremento de potencia, ya que su capacidad nominal.

$$P_n = 5 \text{ MW}$$

Por consiguiente la máquina (a) tendría una sobrecarga de:

$$P_i + \Delta P_a - P_n = 1 \text{ MW}$$

Por lo tanto esta potencia tendrá que ser aportada -- por la máquina (a')

De la tabla de datos vemos que la potencia que puede aportar la unidad (a) es:

$$P_{n_a} - P_{i_a} = 1 \text{ MW}$$

Ahora encontraremos el decremento de frecuencia temporal.  $\Delta F_1$  que corresponde al incremento de potencia de 1 MW

$$\Delta F_1 = \frac{P_{n_a} - P_{i_a}}{NG_a} = \frac{1}{1.39} = 0.719 \text{ HZ}$$

Para este decremento  $\Delta F_1$  obtendremos el incremento -- temporal de potencia

$$\Delta P_a = \Delta F_1 \times NG_a = 0.72 \times 1.39 = 1 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{a'} = \Delta F_1 \times NG_{a'} = 0.72 \times 2.78 = 2 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{S1} = \Delta F_1 \times (NG_a + NG_{a'}) = \Delta F_1 \times NG_{S1} = 0.72 \times 4.17 = 3 \text{ MW}$$

Desde aquí la característica de la máquina (a) vale -- cero por lo que:

$$NG_{S2} = NG_a + NG_{a'} = 0 + 2.78 = 2.78$$

Con lo que se tendrá un el decremento de frecuencia - final  $\Delta F_2$  será para el incremento de potencia restante

$$\Delta P_2 = \Delta P - \Delta P_1 = 6 - 3 = 3 \text{ MW}$$

Por lo que:

$$\Delta F_2 = \frac{\Delta P_2}{N_{GS2}} = \frac{3}{2.78} = 1.079$$

Por lo tanto la frecuencia final es:

$$\Delta F_T = \Delta F_1 + \Delta F_2 = 0.719 + 1.079 = 1.798$$

$$\text{y } \Delta P_a = 1 \text{ MW} \quad \Delta P_{a'} = 5 \text{ MW}$$

En la gráfica siguiente se ve más claramente lo antes desarrollado.

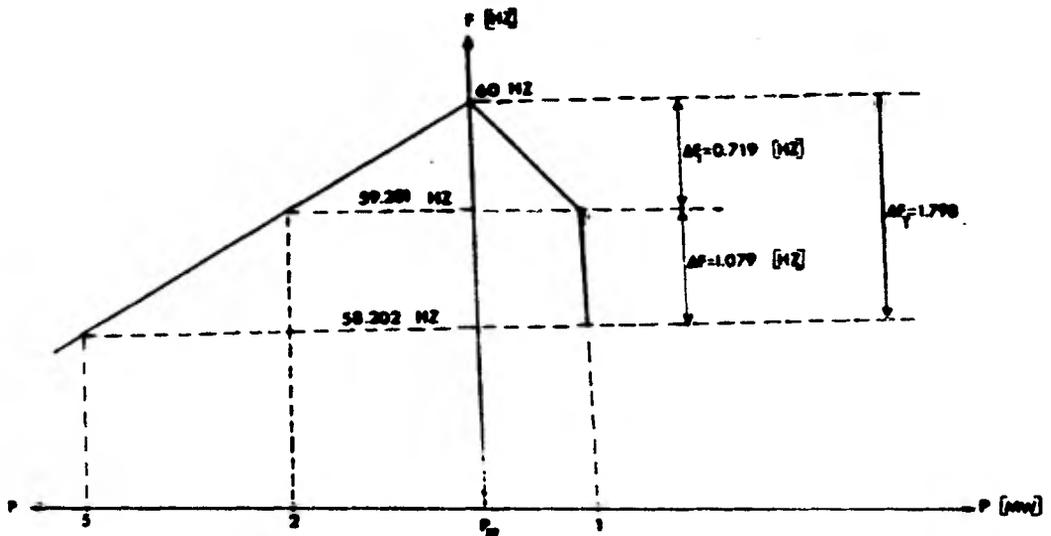


FIG. 1.7

Ejem.

Analizaremos el ejemplo anterior para un incremento de carga de 10 MW en el sistema, en cual los datos se encuentran en la siguiente tabla.

| u/a | Pn | Pi | E | N <sub>G</sub> | ΔP | ΔF |
|-----|----|----|---|----------------|----|----|
|     | MW | MW | % | MW/HZ          | MW | HZ |
| a   | 5  | 3  | 6 | 1.39           |    |    |
| a'  | 10 | 4  | 6 | 2.78           |    |    |
| A   | 15 | 7  | - | 4.17           |    |    |
| A'  | 10 | 6  | 5 | 3.33           |    |    |
| S   | 25 | 13 | - | 7.50           | 10 |    |

Calculando el incremento de frecuencia.

$$F = \frac{\Delta P}{N_S} = \frac{10}{7.5} = 1.33 \text{ HZ}$$

Los incrementos de potencia.

$$\Delta P = N_S \times \Delta F:$$

$$\Delta P = 1.39 \times 1.33 = 1.8487 \text{ (MW)}$$

$$\Delta P_{a'} = 2.78 \times 1.33 = 3.6974 \text{ MW}$$

$$\Delta P_A = \Delta P_a + \Delta P_{a'} = 1.8487 + 3.6874 = 5.5461 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{A'} = 3.33 \times 1.33 = 4.4289 \text{ MW}$$

$$\Delta P_S = \Delta P_A + \Delta P_{A'} = 5.5461 + 4.4289 = 9.975 \text{ MW}$$

$$\Delta P_S = 9.975 \text{ MW}$$

De los resultados anteriores se muestra que las uni-

dades A' y a se saturan.

Ahora veremos cual es la que se satura primero.

$$\Delta F_{af} = \frac{1}{1.39} = 0.719 \text{ Hz} \quad \Delta F_{A'} = \frac{4}{3.33} = 1.20 \text{ Hz}$$

De los resultados anteriores vemos que la unidad (a) es la que se satura primero y después la unidad (A') por lo tanto.

$$\Delta F_1 = \Delta F_a = 0.719$$

$$\Delta P_{a_1} = 0.719 \times 1.39 = 1 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{a'} = 0.719 \times 2.78 = 2 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{A'_1} = 0.719 \times 3.33 = 2.395 \text{ MW}$$

Ahora tenemos que  $\Delta F_{A'}$  es la frecuencia a la cual se satura la máquina A' por lo tanto  $\Delta F_2 = \Delta F_{A'} - \Delta F_1 = 1.20 - 0.719$

$$\Delta F_2 = 0.481 \text{ Hz}$$

Con este valor de frecuencia vamos a calcular los nuevos valores de potencia generadora.

$$\Delta P_{a_2} = 0.481 \times 2.78 = 1.337$$

$$\Delta P_{A'_2} = 0.481 \times 3.33 = 1.6017$$

$$\Delta P_{a'_T} = P_{a'_1}, P_{a'_2} = 3.337$$

$$\Delta P_{A_T} = \Delta P_{A_1} + \Delta P_{A_2} = 3.995$$

De los resultados obtenidos vemos que la unidad A' se satura para un decremento de frecuencia de 1.20 HZ a partir\_ de este momento la potencia restante la aportará la unidad - (a') con un decremento de:

$$\Delta F_3 = \frac{1.665}{2.78} = 0.5981 \text{ H}_2$$

La potencia generada por este decremento de frecuen-- cia es:

$$\Delta P_{a'} = 5 \text{ (MW)}$$

Para un decremento de frecuencia total de la unidad - (a').

$$\Delta F_1 + \Delta F_2 + \Delta F_3 = 0.719 + 0.481 + 0.598$$

$$\Delta F_1 + \Delta F_2 + \Delta F_3 = 1.798 \text{ H}_2.$$

### CARACTERISTICAS DE LA CARGA

En todos los desarrollos anteriores, se consideró que la carga no es función de la frecuencia, ahora analizaremos la carga en función de la frecuencia.

Al variar la frecuencia variará la carga, y en estas condiciones la carga, tendrá una curva característica cuya pendiente será de signo contrario a la de la característica de generación del sistema.

De la característica de generación:

$$N_G = \frac{\Delta P_G}{\Delta F} = \frac{\Delta G}{\Delta F} \quad \frac{MW}{HZ}$$

De donde:

$$\Delta G > 0 \text{ y } \Delta F > 0$$

Sustituyendo en la ecuación de la característica

$$N_G = \frac{\Delta G}{-\Delta F} = -\frac{\Delta G}{\Delta F} = -N_G \quad \frac{MW}{HZ}$$

Ahora de la característica de la carga:

$$N_K = \frac{\Delta P_K}{\Delta F} = \frac{\Delta K}{\Delta F} \quad \frac{MW}{HZ}$$

Para el caso de la carga el incremento de esta y la frecuencia es positivo.

$$\Delta K > 0 \quad \text{Y} \quad \Delta F > 0$$

Sustituyendo en la ecuación de la característica:

$$N_K = \frac{\frac{\Delta K}{\Delta F}}{+} = + \frac{\bar{N}_K}{\text{HZ}} \quad \left( \frac{\text{MW}}{\text{HZ}} \right)$$

La generación, por efecto de los reguladores de velocidad aumenta si la frecuencia baja, por su parte la carga aumenta si la frecuencia sube. Es decir la característica de generación  $N_G$  es negativa y la característica de la carga  $N_K$  es positiva.

La característica del sistema será igual a la suma de las características de generación de las máquinas y de la carga.

$$N_S = N_G + N_K$$

Es conveniente examinar lo que es la característica de la carga para lo cual se necesita relacionar la potencia  $P$  con el par  $T$  y la velocidad angular  $\omega$  expresada en HZ es la frecuencia que se ha usado hasta ahora.

$$N_K = \frac{\Delta P_K}{\Delta F} \quad \left[ \frac{\text{MW}}{\text{HZ}} \right]$$

O sea:

$$\Delta P_K = N_K \Delta F \quad [\text{MW}]$$

Se presentan los siguientes casos:

1).- La potencia de la carga no es función de la frecuencia.

$$P \neq f(F) \quad \text{MW}$$

O sea  $N_K = 0$

(caso analizado anteriormente).

2).- La potencia de la carga es función de la frecuencia.

$$P = f(F) \quad \text{MW}$$

Por definición de potencia:  $P = T_w = T F \quad \text{MW}$

Cuando la carga es motriz.

La función es lineal si  $T \neq f(F)$

O sea:  $T = K_1$  (constante)

Resultando  $P = K_1 F$  (MW)

La potencia de la carga no es función lineal de la --  
frecuencia  $T = f(F)$

Por ejemplo:  $T = K_2 F$  ( $K_2$  es constante)

Que resulta:  $P = K_2 F \times F = K_2 F^2$  (MW)

3).- Por lo general el par si es función de la frecuencia pe  
ro como los sistemas tienen tanto carga motriz como resisti-  
va lo común es que la característica de la carga no sea cero;

$N_K \neq 0$  o sin embargo es raro encontrar que la potencia de la carga sea función mayor que el cuadrado de la frecuencia.

Esta característica  $N_K$  debe ser medida tan frecuentemente como sea posible para que al combinarla con el valor  $-NG$ , que está más o menos definido, se conozca la característica resultante de ambos  $N_C$ .

El valor  $N_K$  ordinariamente se expresa como sigue:

$$N_K = \frac{\Delta PK}{\Delta F} = \frac{\Delta K}{\Delta F} \frac{(\%)}{(\%)}$$

Dándole el valor siguiente:

$$N_K = \frac{1 \text{ a } 2 (\%) \text{ de Potencia}}{1 (\%) \text{ de frecuencia}}$$

Para poder ver más claramente lo anterior se ilustra un ejemplo:

Consideraremos un sistema formado por dos áreas -----  
(A, A').

El área (A) está formada por 3 unidades (a, a', a'') y el área A' constituye una sola unidad, a continuación presentamos la tabla de datos.

| U/A   | Pn    | Pi    | E | NG    | $\Delta P$ | $\Delta F$ | NK |
|-------|-------|-------|---|-------|------------|------------|----|
| Sist. | MW    | MW    | % | MW/HZ | MW         | HZ         |    |
| a     | 700   | 500   | 6 |       |            |            |    |
| a'    | 500   | 400   | 6 |       |            |            |    |
| a''   | 250   | 100   | 5 |       |            |            |    |
| A     | 1450  | 1000  | - |       |            |            |    |
| A'    | 10000 | 9000  | 5 |       |            |            |    |
| S     | 11450 | 10000 | - |       | 500        |            |    |

Si la carga está en función de la frecuencia, se requiere saber cual es la frecuencia final del sistema y la potencia generada por cada una de las máquinas si la unidad (a) se sale de operación.

#### CALCULOS:

De la ecuación siguiente:

$$N_G = \frac{P_n}{EF_n}$$

$$\text{Entonces: } N_{G_a'} = \frac{500}{0.06 \times 60} = 138.8 \frac{\text{MW}}{\text{HZ}} \quad N_{G_S} = N_{G_A} + N_{G_A'}$$

$$N_{G_{a''}} = \frac{250}{0.05 \times 60} = 83.33 \frac{\text{MW}}{\text{HZ}} \quad N_{G_S} = 222.13 + 3333.33$$

$$N_{G_{A'}} = \frac{10,000}{0.05 \times 60} = 3333.33 \frac{\text{MW}}{\text{HZ}} \quad N_{G_S} = 3555.46 \frac{\text{MW}}{\text{HZ}}$$

$$N_{G_A} = N_{G_a} + N_{G_{a'}} = 138.8 + 83.33 = 222.13$$

Ahora calcularemos el  $N_k$  del sistema.

$$N_{K_S} = \frac{1(\%) (P_i + \Delta c)}{1(\%) (F_i)}$$

$$N_{K_S} = \frac{(0.01) (9500 + 500)}{(0.01) (60)} = 166.66 \frac{MW}{HZ}$$

Con los cálculos anteriormente realizados se obtendrá la característica de generación del sistema:

$$N_S = N_{G_S} + N_K$$

$$\text{Entonces: } N_S = 3555.46 + 166.66 = 3722.12 \frac{MW}{HZ}$$

Ahora con este valor calculado de ( $N_S$ ) se calculará el incremento de frecuencia de acuerdo con las condiciones dadas:

$$N_S = \frac{\Delta C}{\Delta F}$$

Donde:

$$\Delta F = \frac{\Delta C}{N_S} = \frac{500}{3722.12} = 0.134332$$

De acuerdo con este decremento de frecuencia se calculará el incremento de generación de cada unidad y el incremento de potencia que da la carga.

$$\Delta P_{a'} = \Delta F \times N_{G_{a'}} = 0.134332 \times 138.8 = 18.645 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{a''} = \Delta F \times N_{G_{a''}} = 0.134332 \times 83.33 = 11.2 \text{ MW}$$

$$\Delta P_A = \Delta F \times H_{GA} = 0.134332 \times 3333.33 = 447.70 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{GS} = 447.78 + 11.2 + 18.645 = 477.62 \text{ MW}$$

$$\Delta P_K = \Delta F \times H_{KS} = 0.134332 \times 166.66 = 22.38 \text{ MW}$$

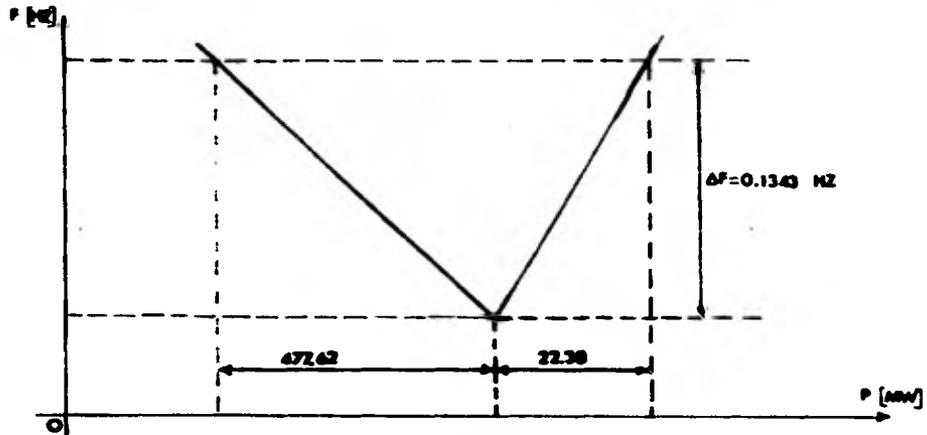


FIG. 18

De acuerdo con esta gráfica se comprueba que la carga es función de la frecuencia.

## CAPITULO II

## CONSTITUCION Y CLASIFICACION DE LA MAQUINA SINCRONA

Por máquinas sincróna se entienden los convertidores - electro mecánicos rotativos que, girando a una velocidad constante proporcional a la frecuencia del sistema eléctrico, --- transforman la energía mecánica a energía eléctrica, bajo la forma de corrientes alternas o viceversa, la energía eléctrica de corrientes alternas en energía mecánica.

Como sabemos todas las máquinas eléctricas rotativas - responden a una constitución muy parecida, diferenciándose -- más bien por la naturaleza de la corriente eléctrica generada o utilizada y por su excitación.

A consecuencia de ello, la máquina sincróna, como la - máquina de corriente continua y la de inducción consta de un devanado inducido y un devanado inductor concatenado por un - campo magnético, caracterizándose por tener el devanado inducido en el estator, alojado en ranuras practicadas en la superficie cilíndrica interna del paquete magnético y el devanado\_ inductor alimentado por corriente continúa, en el rotor. En - máquinas de reducida potencia hasta unos 5 K V A. la situación de los devanados es inversa: inducido en el rotor e inductor en el estator, como en las máquinas de corriente continua.

Al ser la corriente de excitación continua, la velocidad de giro de esta máquina sólo puede ser la síncrona  $N$ , impuesta por la pulsación de las corrientes alternas del estator (frecuencia) y por el número de pares de polos (  $P$  )

$$N_1 = 120 \frac{f}{P}$$

y de aquí la designación de la máquina síncrona.

Como las demás máquinas rotativas, las máquinas síncronas son reversibles, pudiendo funcionar indistintamente - como generadores monofásicos o polifásicos, de corriente alterna (alternador), o como motores de corriente alterna (motor síncrono).

Es más, sin solución de continuidad un alternador puede pasar a funcionar como motor síncrono, o inversamente, un motor síncrono como alternador, la única diferencia está en el sentido de la conversión de la energía. A causa de esta particularidad la potencia y el par pasan a tener un signo algebraico.

Como alternador, la máquina síncrona, constituye el generador más importante de energía eléctrica más del 90% de la energía eléctrica actualmente se producen en este tipo de

máquina.

La frecuencia de la corriente alterna generada por un alternador es la correspondiente a la velocidad síncrona:

$$f = \frac{Pn \sin}{120} \text{ (HZ)}$$

Resumiendo, la máquina síncrona es un convertidor---- electromecánico rotativo de corriente alterna, excitado por corriente continua, o por imanes permanentes en máquinas pequeñas, cuyo funcionamiento impone una relación entre la frecuencia de la corriente del inducido, la velocidad de rotación y el número de polos.

Según el número de fases del devanado inducido, las máquinas síncronas pueden clasificarse en:

Monofásica

Polifásica (Generalmente trifásica)

Por la forma constructiva del sistema inductor la máquina síncrona cabe clasificarla en:

a).- Máquina de rotor de polos salientes, disposición constructiva, propia de máquinas de baja y mediana veloci-

dad, hasta 1000 r.p.m. en potencias mayores.

b).- Máquina de rotor cilíndrico exclusivamente empleado en máquinas de alta velocidad y elevada potencia.

Cuando actúan como generadores, la primera es conocida como alternador hidráulico y la segunda acoplada directamente a turbinas de vapor, como turbo alternador.

El objetivo que se persigue en este análisis es ver -- cuales son los conceptos fundamentales que son necesarios para entender el funcionamiento de la máquina síncrona, considerando los diversos límites térmicos a saber calentamiento del rotor y estator tanto para una máquina de polos salientes como para una máquina de rotor cilíndrico, así como también definir lo que es reactancia síncrona.

Para analizar el comportamiento de la máquina síncrona es indispensable efectuar ciertas pruebas que se describirán en lo adelante, despreciando los efectos de saturación, dispersión y resistencia.

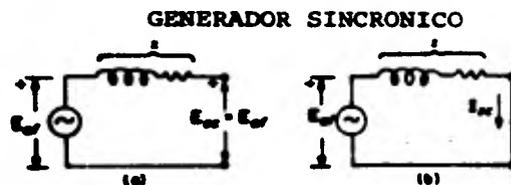
### PRUEBAS DE CIRCUITO ABIERTO Y DE CORTO CIRCUITO

La impedancia sincrona no saturada y un valor aproximado de la impedancia sincrona saturada pueden obtenerse de las pruebas de circuito abierto y corto circuito.

En el caso de una fuente constante de voltaje que tiene una impedancia constante, la impedancia se puede encontrar dividiendo el voltaje terminal de circuito abierto por la corriente de corto circuito. Sin embargo cuando la impedancia es una función del voltaje de circuito abierto, como lo es -- cuando la máquina está saturada, las características de circuito abierto o curva de magnetización en adición a las características de circuito corto son requeridas.

La reactancia sincrona no saturada es contante debido a que la reluctancia del hierro no saturada es despreciable.

El circuito equivalente de una fase de una máquina sincrona polifásica se muestra en la Fig. siguiente.



En la Fig. III.1.a) la condición de circuito abierto y en la-- Fig. III.1.b) la condición de corto circuito.

Ve es la misma en ambos casos cuando la impedancia  $Z = \frac{V_e}{I_{cc}}$  donde  $V_e$  son los Volts de circuito abierto por fase y  $I_{cc}$  es la corriente de corto circuito por fase.

#### CARACTERISTICAS DE CIRCUITO ABIERTO

Para obtener las características de circuito abierto - de la máquina, se impulsa a su velocidad nominal sin carga, - tomando lectura de voltaje de línea a línea, para varios valores de la corriente de campo. El voltaje se escalona hacia - abajo por medio de transformadores de potencial para instrumentos excepto en máquinas de muy bajo voltaje, la fig. (II-2) muestra las características de circuito abierto o de curva de saturación. Se muestran dos grupos de escalas: Volts. de línea a línea contra corriente de campo en amperes y la otra en voltaje de circuito abierto por unidad contra corriente de -- campo por unidad. Si no fuera por la saturación magnética -- del hierro, las características del circuito abierto serían - lineales como está representado por la línea del entre hierro en la fig. (II.2).

Es importante hacer notar que 1.0 por unidad de la corriente de campo produciría un voltaje nominal si no hubiera saturación.

En base a esta convención, la representación por unidad es tal que hace que las líneas del entrehierro de todas las máquinas sean idénticas.

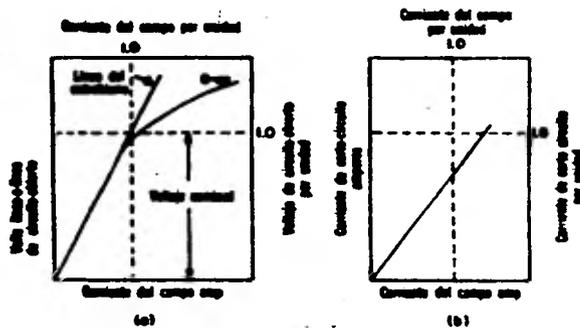


FIG. II.2 (a) Característica de circuitoabierto. (b) Característica de corto-circuito.

### PRUEBA DE CORTO CIRCUITO

Las tres terminales de armadura están en corto circuito a través de un circuito medidor de corriente, que con excepción de pequeñas máquinas es un transformador de corriente de instrumentos con un amperímetro en su secundario. Un diagrama de conexiones en el que se omite el transformador de corriente se muestra en la fig. (II.3).

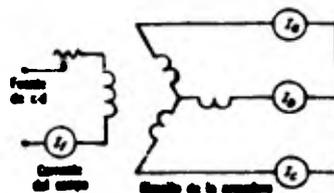


FIG. II.3 Diagrama de conexiones para una prueba de corto-circuito.

La máquina se impulsa aproximadamente a velocidad sincrónica (Nominal) y se hacen mediciones de la corriente de corto circuito de armadura para varios valores de la corriente de campo, usualmente hasta un valor arriba de la corriente nominal de armadura.

La característica de corto circuito, es decir corriente de corto circuito de armadura contra corriente de campo se muestra en la fig. (II.4).

En máquinas sincrónicas convencionales la característica de corto circuito es prácticamente lineal debido a que el hierro es no saturado hasta un valor arriba de la corriente de armadura nominal debido a que los ejes magnéticos de la armadura y del campo, prácticamente coinciden (si la armadura tuviera cero resistencia los ejes magnéticos estarían exactamente alineados), y las fuerzas magnetomotrices del campo y de la armadura se oponen entre sí.

#### IMPEDANCIA SINCRONA NO SATURADA

Las características de circuito abierto y corto circuito están representadas en la misma gráfica de la Fig. (II.4)

La corriente de campo  $O_a$  produce un voltaje de línea a

línea  $O_c$  en la línea del entrehierro que sería el voltaje de circuito abierto si no hubiera saturación. El mismo valor de la corriente de campo  $O_a$  produce saturación. El mismo valor de la corriente de campo  $O_a$  produce la corriente de armadura  $O'd$  y la reactancia sincrónica  $X_s$  no saturada es:

$$X_s = \frac{O_c}{\sqrt{3} O'd} \quad \text{OHMS}$$

Pero como despreciamos saturación podemos expresarla - en términos de voltaje y la corriente de armadura.

$$X_s = \frac{V_e}{I_{cc}} \quad \text{OHMS}$$

Cuando la características de circuito abierto, línea de entrehierro, y la característica de corto circuito se grafican en valor por unidad, entonces el valor en por unidad - en la reactancia sincrónica no saturada iguala al voltaje por unidad, al voltaje de la línea del entrehierro que resulta - del mismo valor de la corriente de campo como aquella que produce una corriente nominal de armadura (p.u.) de corto circuito. En la fig. ( II.4), éste sería el valor por unidad en la línea del entrehierro correspondiente a la corriente de campo  $O_g$  como:

$$V_e = V_h = 1 \text{ p.u}$$

En donde nos queda:

$$X_s = X_d = \frac{1}{0 \cdot d}$$

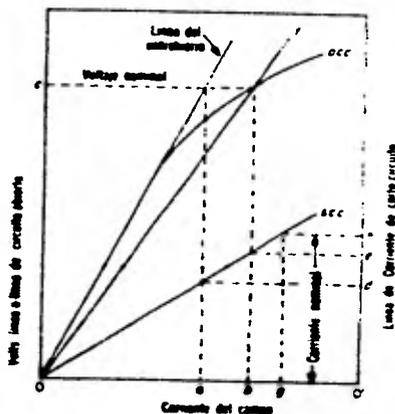


FIG. II.4 Características de circuito abierto y corto-circuito.

#### RELACION DE CORTO CIRCUITO R C C

La relación de corto circuito (RCC) es una medida del tamaño físico de una máquina síncrona para valores nominales de factor de potencia, K V A, y velocidad. La relación de corto circuito se define como la relación de la corriente de campo para voltaje de cero carga nominal a velocidad nominal, entre la corriente de campo para producir la corriente de armadura de corto circuito nominal.

En la fig. (IL.5),  $O_b$  es la corriente de campo que produce un voltaje nominal en la característica de circuito ---abierto y  $O_g$  es la corriente de campo para producir la corriente de corto circuito nominal.

$$R_{cc} = \frac{O_b}{O_g}$$

Despreciando el efecto de saturación, la relación de ---corto circuito es:

$$R_{cc} = \frac{O_a}{O_g} = \frac{O'd}{O'h}$$

Por lo tanto de la expresión anterior y de la expresi---ón de la reactancia síncrona, tenemos que la relación de ---corto circuito es igual al valor inverso de la reactancia ---síncrona.

$$R_{cc} = \frac{1}{X_s} = \frac{1}{X_d}$$

#### DETERMINACION DE LAS DOS REACTANCIAS

Mientras que el entrehierro en máquinas síncronas de ---construcción de rotor cilíndrico es prácticamente de longi---tud uniforme, el entrehierro de las máquinas de polos salien---tes es mucho mayor en el eje de cuadratura, es decir en la ---región media entre polos, que en el eje directo o en los cen

tros de los polos.

Debido a que el entrehierro es de longitud mínima en el eje directo, una  $f_{mm}$  de la armadura dada dirigida a lo largo del eje produce un valor máximo de flujo, y la misma fuerza magnetomotriz dirigida a lo largo del eje de cuadratura donde el eje del entrehierro tiene su mayor longitud produce un valor mínimo del flujo. La reactancia síncrona asociada con el eje directo es por lo tanto un máximo y se le conoce como a la reactancia síncrona del eje directo  $X_d$ . La reactancia síncrona mínima  $X_q$  se denomina reactancia síncrona del eje de cuadratura.

Prueba de deslizamiento para determinar  $X_d$  y  $X_q$ , debido a que la  $f_{mm}$  de la armadura reacciona enteramente en el eje directo cuando la corriente de armadura está atrasada respecto del voltaje generado por  $90^\circ$ , la prueba del factor de potencia cero da el valor de la reactancia síncrona  $X_d$  de eje directo. Sin embargo es impráctico el tratar de cargar un generador de tal manera que la  $f_{mm}$  de su armadura reaccione solamente a lo largo del eje de cuadratura para obtener la reactancia síncrona  $X_q$ .

La prueba de deslizamiento se hace aplicando un reducido voltaje trifásico balanceado al estator a frecuencia nomi-

nal mientras que al rotor se la hace girar un poco arriba o abajo de la velocidad síncrona, con el circuito de campo -- abierto.

El eje directo y el eje de cuadratura del rotor se deslizan alternadamente fuera del eje de la  $f_{mm}$  de la armadura, causando que la  $f_{mm}$  de la armadura reaccione alternadamente a lo largo de los ejes, (directo y cuadratura'),

La secuencia de fase del voltaje aplicado debe ser -- tal que la  $f_{mm}$  de la armadura y del rotor giren en la misma -- dirección. Si se toman oscilogramas del voltaje en terminales de la armadura, corriente de armadura y el voltaje a través del embobinado abierto del campo. El deslizamiento indicado en la fig. (II.5) es demasiado alto para valores precisos de  $X_d$  y  $X_q$  debido a las corrientes de eddy inducidas en las -- caras de los polos y embobinados de amortiguamiento, cuando -- éstos están en las caras de los polos.

El deslizamiento debe hacerse procurando no sacar el -- rotor de sincronismo, razón por la cual se aplica un voltaje reducido.

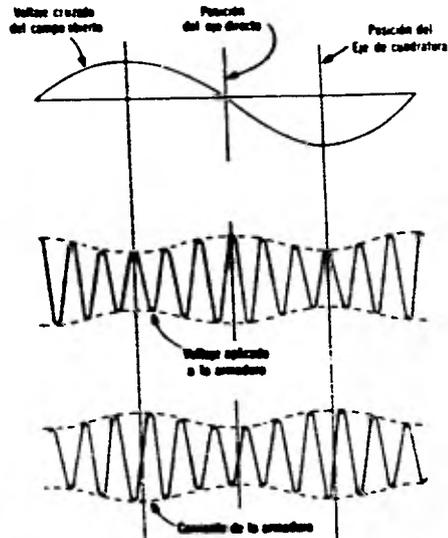


FIG II.5 Oscilogramas para pruebas de deslizamiento. (En práctica, el deslizamiento debe ser mucho menor que el arriba indicado.)

Las reactancias de eje directo y de eje de cuadratura se encuentran del oscilograma de la siguiente forma:

$X_d$ .- Relación de los Volts por fase aplicado a los amperes por fase de la armadura para la posición del eje directo.

El voltaje a través del embobinado abierto del campo es un máximo para la posición del eje directo.

$X_q$ .- Relación de los Volts por fase aplicados a los amperes por fase de la armadura para la posición del eje de cuadratura.

Los valores aproximados de  $X_d$  y  $X_q$  pueden obtenerse de las lecturas de los voltímetros y amperímetros. El amperímetro indica un valor mínimo de la corriente para la posición - del eje directo y un valor máximo para la posición del eje de cuadratura, por lo tanto su deflexión oscila entre un mínimo\_ y un máximo. Si la fuente tiene una impedancia considerable, la oscilación en las lecturas del amperímetro están acompañadas por oscilaciones en las lecturas del voltímetro, con un - voltaje máximo  $V_{max}$  ocurriendo cuando la corriente  $I_{mínima}$  es un mínimo.

Esto indica por el oscilograma en la fig. (II.5) cuando se desprecia la resistencia de armadura.

$$X_d = \frac{V_{MAX}}{I_{MIN}}$$

$$X_q = \frac{V_{MIN}}{I_{MAX}}$$

## DIAGRAMAS VECTORIALES.

Para simplificar el estudio nos limitaremos únicamente a considerar los componentes fundamentales de las ondas de la  $f_{mm}$  de flujo y de  $f_{ems}$ , despreciando sus armónicas superiores.

Se admitirá también (lo que por otra parte es correcto en las máquinas síncronas, a causa de que su entrehierro es - muy superior al de un motor de inducción) que, el flujo principal, excitado por la  $f_{mm}$ , resultante, está en fase con ésta en vez de ir retrasado del ángulo de pérdida en el hierro, como se tiene en los transformadores y en las máquinas de inducción.

Aunque la corriente inductora sea continua, la onda fundamental de la  $f_{mm}$  de excitación para un observador situado en un punto del inducido, aparecerá como una onda senoidal variable en el tiempo y como tal podrá ser representada por un vector,  $F_e$  cuyo eje coincidirá en el espacio con el eje de los polos o' eje longitudinal de la máquina,  $d, d'$  fig. (II.6)

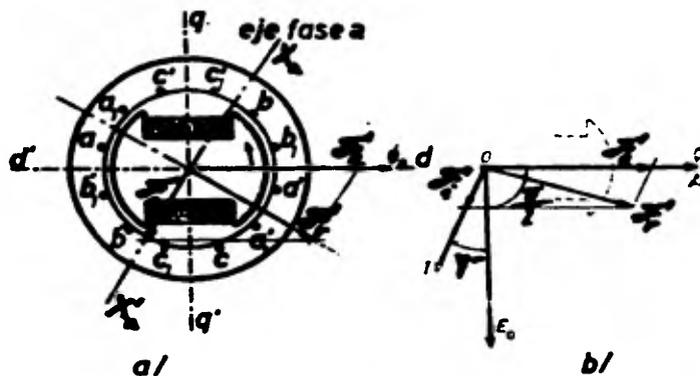


FIG. 6. Composición de las f.m.m.s. de una máquina síncrona:  
a) Diagrama en el espacio. b) Diagrama en el tiempo.

Para este mismo observador, funcionando la máquina en vacío, se comprobará que los conductores del inducido, que son base del valor máximo de la fem inducida en cada instante, son justamente los que se hallan sobre el plano diametral que determinan el vector  $F_e$ , pues son los que cortarán el valor máximo de la onda de inducción del flujo inductor giratorio,  $\phi_0$ , excitado por  $F_e$ . Este flujo podemos representarlo también por un vector  $\phi = 0 A$  en fase con  $F_e$ , y cuyo valor al admitir la máquina no saturada será proporcional a  $F_e$ .

$$\phi = \frac{F_e}{R_1}$$

Donde  $R_1$  es la reluctancia del circuito magnético de este flujo, al aceptar la máquina no saturada es constante ( $R$ ) y la fem inducida en vacío,  $\xi_0$  en valor eficaz por la

conocida expresión.

$$V_e = E_e = 4.44 \epsilon_0 f Z_0$$

Donde:

$\epsilon_0$  = factor de embobinado

$Z_0$  = No. de conductores por fase

$f$  = Frecuencia.

En un diagrama en el tiempo,  $V_e$ , esta defasada  $90^\circ$  -- respecto al flujo inductor.  $\phi$  Fig. (II.6)

En carga al circular por el devanado inducido un sistema simétrico de corriente polifásico, nos creará una onda de fmm de reacción de inducido cuya componente fundamental,  $F_1$  podremos también representar por un vector, onda que tiene, respecto al inducido, igual velocidad y sentido que  $F_e$ .

El valor máximo de  $F_1$  viene dado por:

$$F_1 = \frac{m}{2} 0.9 \epsilon_{b1} \frac{N_t I}{P}$$

Siendo:

$m$  el número de fases

$\epsilon_b$ , el factor de bobinado

$N_t$  espiras por fase del devanado

$I$  Intensidad de la corriente en valor eficaz, por espiras.

Si imaginamos que son las espiras  $aa'$  y  $a, a'$  de la fase a las que, en el instante considerado en la fig. (II.6) son recorridos por la corriente máxima, el vector coincidirá en el espacio en ese instante con el eje  $Xa Xa'$  de esta bobina.

La composición vectorial de las dos fmm,  $F_e$  y  $F_i$  nos dará la fmm resultante giratoria,  $F_r$ , la cual excitará, en el conjunto del circuito magnético inductor e inducido, el flujo principal giratorio senoidal,  $\phi$  en fase con  $F_r$ .

Este flujo será en que en carga inducirá en cada una de las fases del devanado del estator la fem de valor eficaz  $E_r$  defasada en el tiempo  $90^\circ$  del vector flujo,  $\phi$  que será base, en ese instante del máximo valor de la fem.  $E_r$

La fem inducida  $E_r$  y la tensión en bornes, diferirán únicamente en la caída óhmica debida a la resistencia propia efectiva del devanado inducido, cuyo vector representativo está en fase con la corriente y en la caída reactiva (igual y contraria a la de autoinducción debida al flujo de dispersión  $E_r = jX_r I$ ) en cuadratura, y en avance con la corriente.

En notación compleja, tendremos, pues por fase la re-

lación siguiente:

$$E_r = U + RI + jX_s I$$

Cuyo diagrama vectorial es el siguiente

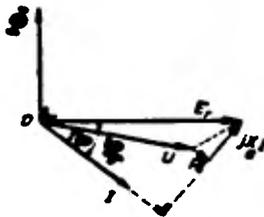


FIG II 7 Diagrama vectorial de tensiones:

$E_r$  = f.e.m. resultante.  
 $U$  = tensión en bornes.

#### DIAGRAMA VECTORIAL DE LA MAQUINA SINCRONA DE ROTOR CILINDRICO

La composición vectorial de la fems podemos expresar las en las máquinas de rotor cilíndrico, en función a los -- flujos que éstos producen, como la trayectoria del circuito\_ magnético de todos ellos es la misma y su reluctancia cons-- tante y considerando que el flujo útil es la resultante de - los flujos que determinarían separadamente la fmm del induc-- tor y la fmm de reacción de inducido  $F_i$ , flujos que en el -- diagrama de la fig. (II.8) están representados por  $\phi$  y  $\phi_1$



una fem de reactancia.

$$E_i = - j X_i I$$

Sustituyendo  $E_i$  en la ecuación de  $V_e$  nos queda:

$$V_e = E_r + j X_i I$$

El efecto de la reacción de inducido, según esto puede asimilarse al de una reactancia  $X_i$  en serie con la fem. Er reactancia denominada de reacción de inducido o' reactancia principal, reemplazando en esta última ecuación el valor de  $E_r$  por el valor determinado anteriormente de:

$$E_r = V_t + (R + j X_{\sigma}) I$$

Obtenemos:

$$V_e = V_t + (R + j X_{\sigma} + j X_i) I$$

Ecuación cuyo diagrama vectorial se muestra en la fig.

(II.9)



**DIAGRAMA VECTORIAL DE LA MAQUINA  
SINCRONA DE POLOS SALIENTES.**

Anteriormente hemos puesto bien de manifiesto que la posición relativa de la onda fundamental de la fuerza magnetomotriz de la reacción de inducido  $F_i$ , con respecto a la onda de  $f_{mm}$  de excitación  $F_e$  (cuyo valor máximo coinciden con el eje longitudinal  $d$   $d'$ ) depende de la diferencia de fase entre la corriente  $I$  que circula por el devanado del estator y la  $f_{em}$  aparente que nos inducirá la  $f_{mm}$   $F_e$  de actuar sobre ella, o sea, la  $f_{em}$  que realmente tendríamos en vacío con esta  $f_{mm}$ .

En esta máquina resulta preferible hacer uso del método basado en la teoría de las dos reacciones de Blondel en la cual se considera en la máquina dos circuitos magnéticos distintos Fig. (II.11): el circuito magnético longitudinal según el eje de los polos inductores de reluctancia  $R_d$  (eje directo) y el circuito magnético transversal (eje de cuadratura), normal al anterior, de reluctancia  $R_q$  y consecuentemente se descompone la onda fundamental de la  $f_{mm}$  de reacción de inducido  $F_i$  en dos componentes normales, una según el eje longitudinal  $d$   $d'$ , la  $f_{mm}$  de reacción inducido longitudinal (eje directo)  $F_d$  y la otra  $f_{mm}$  de reacción inducido transver

sal (eje de cuadratura  $F_q$ ).

Evidentemente para cada uno de estos se verificará la ley de Hopkinson.

$$\phi_{1d} = \frac{F_d}{R_d} \quad \text{y} \quad \phi_{1q} = \frac{F_q}{R_q}$$

Siendo  $\phi_{1d}$  y  $\phi_{1q}$  los flujos que la F.M.M.  $F_d$  y  $F_q$  determinarían respectivamente, en el circuito directo y en cuadratura actuando asiladamente como se ve en la siguiente --- Fig. (II.11)

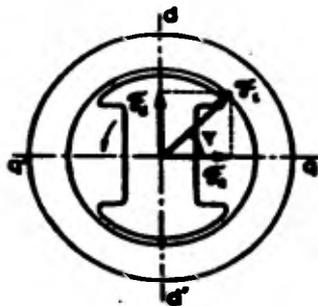


FIG II 11 Descomposición de la f.m.m.  $F_m$  en sus componentes longitudinal y transversal.

El circuito magnético directo comprende trayectos en el entrehierro más o menos saturado, en particular los núcleos de los polos, de modo que el flujo resultante sobre este circuito no será proporcional a la F.M.M., en cuadratura

comprende los huecos interpolares del inductor, de elevada reluctancia, por lo que puede admitirse, que el flujo en cuadratura es proporcional a la F.M.M. en cuadratura.  $F_q$ .

En fase con  $F_e$ , tendremos el vector representativo del flujo fundamental de vacío  $\phi_0$  ver fig. (II.9), excitado por esta F.M.M. y defasado  $90^\circ$  respecto a estos el vector de la f.e.m.  $E_e$ .

Conocido el ángulo  $\psi$  diferencia de fase entre  $E_e$  y la corriente de inducido  $I$  podemos dibujar el vector corriente  $I$  y deducir inmediatamente sus componentes  $I_d$  e  $I_q$  según el eje de los polos  $d-d'$  (eje directo), y el eje en cuadratura  $q-q'$ .

$$I_d = I \sin \psi \quad I_q = I \cos \psi$$

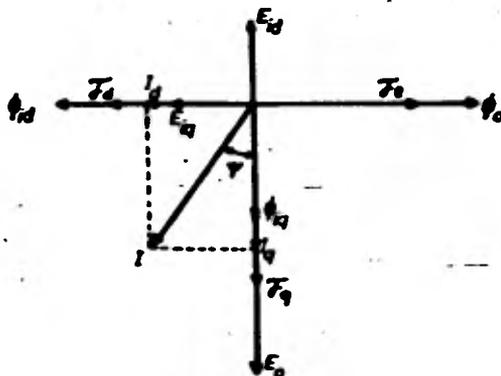


FIG II 12 Diagrama vectorial de f.m.m., flujos y f.e.m. de las máquinas síncronas de polos salientes.

Componentes que nos determinan respectivamente las -- F.M.M. de reacción de inducido en eje directo y en cuadratura  $F_d$  y  $F_q$  a partir de los cuales hallamos los flujos  $\phi_{id}$  y  $\phi_{iq}$  y las F.E.M.

$E_{id}$  y  $E_{iq}$  que estos nos inducen defasadas en retraso de  $90^\circ$

La f.e.m. interna  $E_r$ , inducida por el flujo común resultante trabajando la máquina con la corriente  $I$  será igual a la suma vectorial de las f.e.m.s. inducidas por los flujos componentes  $\phi$  o  $\phi_{id}$  y  $\phi_{iq}$

$$E_r = E_v + E_{id} + E_{iq}$$

Deduciendo de esta f.e.m. la caída inductiva por el flujo de dispersión  $X_d I$  y la resistiva  $R_L$  obtendremos la tensión en bornes de la máquina  $V_t$ , la cual debe quedar defasada del ángulo  $\theta$  fijado por la carga externa, de la corriente  $I$

$$V_t = E_r - R I - j X_d I$$

De estas ecuaciones deducimos el diagrama victorial de la máquina de los polos salientes en la cual la f.e.m.  $E_v$  viene dada por el vector  $\overline{OM}$ , la f.e.m.  $E_{id}$  en oposición de

fase con  $V_e$  por el vector  $\overline{OL}$  y la f.e.m.  $E_{iq}$  normal a los dos anteriores por el vector  $\overline{OQ}$ .

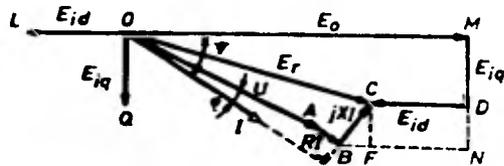


FIG II 13 Diagrama de tensiones de la máquina síncrona de polos salientes (Diagrama de Blondel).

Pero como para nuestros fines despreciamos resistencia de dispersión, tenemos la ecuación de  $V_t$ . es igual a:

$$V_t = E_r$$

Por lo tanto el diagrama vectorial quedará.

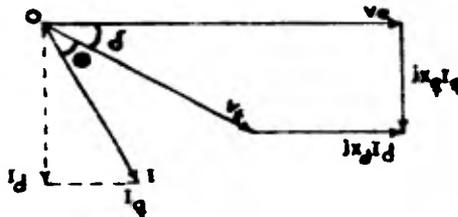


FIG II 14 Diagrama vectorial de la Máquina de Polos Salientes (sin resistencia ni dispersión)

## CAPITULO III

ANALISIS DE LA MAQUINA SINCRONA ROTOR LISO  
Y POLOS SALIENTES.-

Todos los sistemas de potencia operan a frecuencia -- constante y la capacidad de generación se obtiene mediante - máquinas síncronas.

La relación que existe entre velocidad de Sincronismo  $N_s$ , la frecuencia  $f$  y el número de polos  $P$  es:

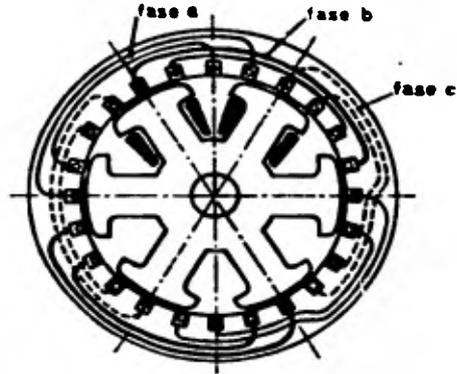
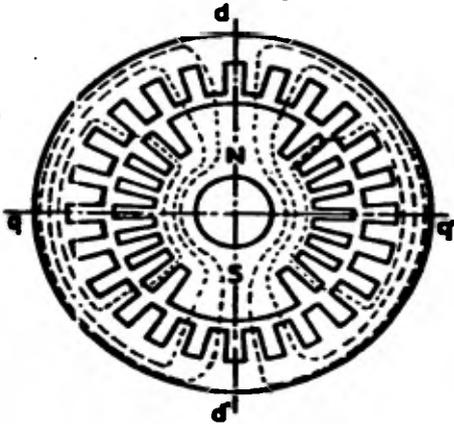
$$N_s = \frac{120 f}{P} \text{ rev/min}$$

Ocasionalmente parte de la capacidad de generación, - se obtiene mediante generadores asíncronos y con bastante -- más frecuencia la falta de potencia reactiva se cubre con con densadores síncronos.

Los generadores en su gran mayoría son de dos tipos -- dependiendo de la velocidad de la turbina. Con turbina de vapor son posibles altas velocidades 3,600, 1,800 rev/min para 60 ciclos con dos y cuatro polos respectivamente.

Para grandes velocidades se requiere que el rotor sea - cilíndrico fabricado de acero forjado con ranuras longitudinales en donde se aloja el devanado de los polos, ésto se mues-

tra en las siguientes figuras.



Máquina síncrona de rotor cilíndrico. Circuito magnético. Máquina síncrona trifásica de polos salientes. Circuito magnético.

Con turbinas hidráulicas la velocidad varía en un rango de 150 a 600 r.p.m. dependiendo de la rueda móvil de la -- turbina y de la carga hidrostática.

Debido a que la Vel. periférica es pequeña, se requiere que el estator sea de gran diámetro con un número grande de polos.

Estas máquinas tienen polos laminados sujetos al spinner por la cual se designan de polos salientes. En cualquiera de los dos casos, ya sea para máquinas de rotor cilíndrico ó de polos salientes la ( $E_{em}$ ) fuerza electromotriz inducida por fase está dada por la relación

$$E = 2k\phi zf$$

En donde:

$\phi$  = Flujo de los polos.

$z$  = No. de Conductores por fase.

$f$  = Frecuencia.

$k$  = Constante.

Los flujos están lejos de tener una forma senoidal pero el voltaje terminal si lo es mediante el proceso de sumar los voltajes generados en los conductores individuales.

Desde el punto de vista eléctrico, existen dos diferencias entre las máquinas de polos lisos (rotor cilíndrico) y la de los polos salientes:

La primera: Las variaciones cíclicas del rotor con respecto a la velocidad síncrona se amortigua mediante la producción de corrientes parásitas en el rotor. La máquina de polos salientes (polos laminados) no es autosuficiente para amortiguar esas desviaciones, es por ésto que generalmente se adiciona el devanado amortiguador que no es otra cosa que una jaula de ardilla ubicada en la superficie de los polos donde las corrientes inducidas pueden circular.

La segunda y más importante diferencia es que la reducción del entrehierro en las máquinas de rotor liso es casi

uniforme en toda la circunferencia del rotor. En la máquina - de polos salientes varía demasiado, de un valor máximo entre - polos (eje q) a un valor mínimo frente a la superficie del po - lo (eje d) es por esta razón que los dos tipos de máquinas -- tienen para el análisis de regulación diagramas fectoriales - distintos.

#### Ecuación General de las Máquinas Síncronas.-

Una máquina Síncrona se define por su expresión general de potencia:

$$S = A + B + C$$

En donde:

$$S = P + jQ$$

Para nuestro análisis la potencia la podemos represen - tar mediante fasores, por lo tanto la potencia terminal (Po - tencia aparente) en la máquina será:

$$S = V_t \cdot I = S e^{j\theta}$$

Definiendo los términos de la ecuación general A, B y

C

$$A = \bar{A} e^{ja} ; \bar{A} = \frac{\bar{V}_t^2}{2} \cdot \frac{X_d + X_q}{X_d \cdot X_q}$$

$$B = \bar{B} e^{jb} ; \bar{B} = \frac{\bar{V}_t^2}{2} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q}$$

$$c = \bar{c} e^{jc} ; \bar{c} = \frac{\bar{V}_e \bar{V}_t}{X_d}$$

Sustituyendo cada uno de los términos anteriores en la expresión general de la máquina síncrona tenemos:

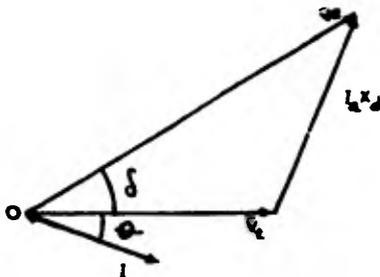
$$S = \frac{\bar{V}_t^2}{2} \frac{X_d + X_q}{X_d X_q} e^{ja} + \frac{\bar{V}_t^2}{2} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} e^{jb} + \frac{\bar{V}_e \bar{V}_t}{X_d} e^{jc}$$

Siendo esta expresión la ecuación general de la potencia para la máquina síncrona ya sea de polos lisos ó polos salientes.

Analizaremos ahora la operación de la máquina como generador de rotor cilíndrico tomando en cuenta la condición de:

$$X_d = X_q$$

Partiendo del diagrama vectorial de la máquina síncrona de rotor cilíndrico visto en el capítulo anterior tenemos:



Del diagrama vectorial obtenemos la ecuación

$$\bar{V}_e = \bar{V}_t + jIaX_d$$

y expresada en su forma polar.

$$\bar{V}_e \epsilon^{je} = \bar{V}_t \epsilon^{jt} + j X_d I_a \epsilon^{ji}$$

Si tomamos a  $\bar{V}_t$  como fasor de referencia la ecuación -  
queda expresada como

$$V_e \epsilon^{jd} = V_t + j X_d I_a \epsilon^{je}$$

Como se hizo referencia anteriormente a la definición  
de potencia general.

$$S = P + jQ$$

Esto es que la potencia aparente es igual a la potencia  
activa más la potencia reactiva y expresada en fasores tene--  
mos que es igual al producto de los fasores  $V_t$  por el conju-  
gado del fasor de la corriente  $I$  es decir:

$$S = \bar{V}_t I_a^*$$

De la ecuación:

$$\bar{V}_e = \bar{V}_t + j I_a X_d$$

Despejamos la corriente  $I$

$$I_a = \frac{\bar{V}_e - \bar{V}_t}{j X_d}$$

Tomando el conjugado de  $I_a$ ;

$$I_a^* = \frac{\bar{V}_e^* - \bar{V}_t^*}{-j X_d} = j \frac{\bar{V}_e^* - \bar{V}_t^*}{X_d}$$

Sustituyendo en la expresión de  $S$ , el valor de  $I_a^*$ ;

$$S = \bar{V}_t \frac{\bar{V}_e^* - \bar{V}_t^*}{-jX_d}$$

Auxiliándonos del postulado de Euler podemos expresar un término conjugado por medio de su módulo y su argumento - con signo combinado.

$$\bar{V}_e^* = \bar{V}_e e^{j\epsilon}$$

$$\bar{V}_t^* = \bar{V}_t e^{-j\theta}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación de la potencia S obtenemos:

$$S = \frac{\bar{V}_t e^{j\theta} \bar{V}_e e^{-j\epsilon} - \bar{V}_t e^{j\theta} \bar{V}_t e^{-j\theta}}{-jX_d}$$

$$S = \frac{\bar{V}_t \bar{V}_e e^{j(\theta-\epsilon)} - \bar{V}_t^2}{-jX_d}$$

Si en el diagrama vectorial de la máquina de rotor cilíndrico tomamos de referencia a  $V_t$  observamos que los argumentos

$$\theta - \epsilon = \delta$$

Multiplicando por  $j$  el numerador y denominador de la ecuación de la potencia S y sustituyendo el valor de los argumentos en la ecuación obtenemos.

$$S = \frac{\bar{V}_t \bar{V}_e e^{-j\delta} e^{j\pi/2}}{X_d} - j \frac{\bar{V}_t^2}{X_d}$$

Agrupando términos obtenemos la ecuación de un generador síncrono de rotor cilíndrico.

$$s = \frac{\bar{v}_t \cdot \bar{v}_e}{x_d} e^{j(\pi/2 - \delta)} - j \frac{\bar{v}_t^2}{x_d} = C + A$$

Donde:

$$A = \frac{\bar{v}_t^2}{x_d} \quad C = \frac{\bar{v}_t \cdot \bar{v}_e}{x_d}$$

A la ecuación de la máquina síncrona de rotor cilíndrico la podemos obtener también a partir de la ecuación general de las máquinas síncronas como sigue:

$$s = \frac{\bar{v}_t^2}{2} \cdot \frac{x_d + x_q}{x_d^2} \cdot e^{j(-\pi/2)} + \frac{\bar{v}_t^2}{2} \cdot \frac{x_d - x_q}{x_d^2} \cdot e^{j(\pi/2 - 2\delta)} + \frac{\bar{v}_t \cdot \bar{v}_e}{x_d} \cdot e^{j(\pi/2 - \delta)}$$

Tomando en cuenta que la reactancia de eje directo es igual a la reactancia en cuadratura, la ecuación general nos queda de la siguiente forma:  $x_d = x_q$

$$s = \frac{\bar{v}_t^2}{x_d} e^{j(-\pi/2)} + \frac{\bar{v}_t \bar{v}_e}{x_d} e^{j(\pi/2 - \delta)}$$

Por el postulado de Euler;

$$e^{-j\pi/2} = -j$$

Nos queda finalmente que:

$$s = \frac{\bar{v}_t - \bar{v}_e}{x_d} e^{j(\pi/2 - \delta)} - j \frac{\bar{v}_t^2}{x_d}$$

Podemos ver que la ecuación anterior es idéntica a la ecuación desarrollada anteriormente para un generador síncrono de rotor liso.

#### DIAGRAMA DE CAPABILIDAD.

A fin de hacer un uso completo y económico de una máquina síncrona es necesario que se entienda con claridad los factores que incluyen en el régimen máximo posible del generador y como se puede cambiar el régimen. Para fines de planeación de un sistema, es esencial entender como están asociados los diversos parámetros del generador síncrono con el régimen máximo en diversas condiciones de operación, a fin de asegurar la elección de la máquina más adecuada desde el punto de vista económico como de ingeniería.

Por estas razones se ha desarrollado una representación gráfica del régimen del generador síncrono en Mega Watts y en Mega Volts amperes reactivos. Este diagrama que se llama diagrama de capacidad muestra los límites hasta los cuales se puede cargar con seguridad una máquina síncrona para cualquier condición de funcionamiento, desde factor de potencia cero -- atrazado hasta factor de potencia cero adelantado. Se utilizan coordenadas cartesianas rectangulares en eje horizontal -

los (MW), y en eje vertical los valores positivos en (MVar).

Representaremos la capacidad de la máquina de rotor cilíndrico en los ejes coordenados P,Q, en donde la potencia aparente S está formada por un término que nos representa el centro del círculo y el otro término.

$$\frac{\bar{V}_t - \bar{V}_e}{X_d}$$

que representa el radio del círculo mencionado.

Como estos términos son fasores cada uno de ellos tendrá su dirección y sentido como se ilustra en el siguiente -- diagrama de capacidad de la máquina de rotor cilíndrico.

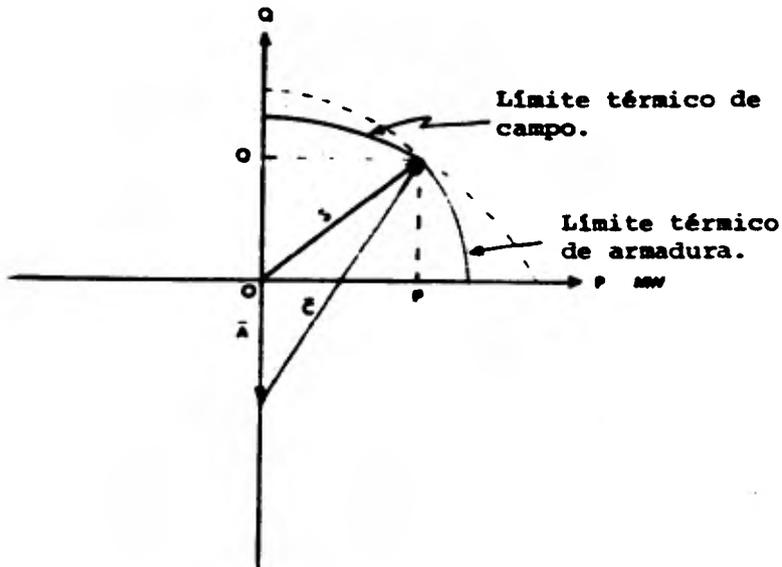


Diagrama de Capacidad  
Máquina Rotor Cilíndrico

Del diagrama de capacidad observaremos que el módulo  $S$  es el radio del círculo que nos representa el límite térmico del campo.

Del diagrama de capacidad vemos que en el cruce de los dos círculos nos muestra un punto que representa la potencia nominal que la máquina puede aportar.

Desarrollando la ecuación de la máquina de rotor liso podemos calcular la potencia activa y la potencia reactiva que esta máquina puede aportar.

$$S = \frac{\bar{V}_t \cdot \bar{V}_e}{X_d} e^{j(\pi/2 - \delta)} - j \frac{\bar{V}_t}{X_d}$$

Para poder desarrollar la ecuación mencionada, el término,

$$e^{j(\pi/2 - \delta)}$$

lo sustituimos por su igualdad trigonométrica y la desarrollamos.

$$e^{j(\pi/2 - \delta)} = \cos(\pi/2 - \delta) + j \operatorname{sen}(\pi/2 - \delta)$$

$$e^{j(\pi/2 - \delta)} = \cos \pi/2 \cos \delta + \operatorname{Sen} \pi/2 \operatorname{Sen} \delta + j(\operatorname{Sen} \pi/2 \cos \delta - \cos \pi/2 \operatorname{Sen} \delta)$$

Donde:

$$\begin{aligned}\cos \frac{\pi}{2} &= 0 \\ \text{Sen} \frac{\pi}{2} &= 1\end{aligned}$$

Sustituyendo cada valor del seno y del coseno en la expresión anterior de Euler.

$$e^{j(\frac{\pi}{2} - \delta)} = (0)\cos\delta + (1)\text{Sen}\delta + j(1)\cos\delta - (0)\text{Sen}\delta$$

Y por último la expresión Euleriana en términos trigonométricos nos queda:

$$e^{j(\frac{\pi}{2} - \delta)} = \text{Sen}\delta + j\cos\delta$$

Sustituyendo la igualdad trigonométrica en la ec. de la máquina de rotor cilíndrico tenemos:

$$s = \frac{\bar{V}_e \cdot \bar{V}_t}{X_d} (\text{sen}\delta + j\cos\delta) - j \frac{V_t^2}{X_d}$$

De esta ecuación obtenida agrupando términos semejantes tenemos:

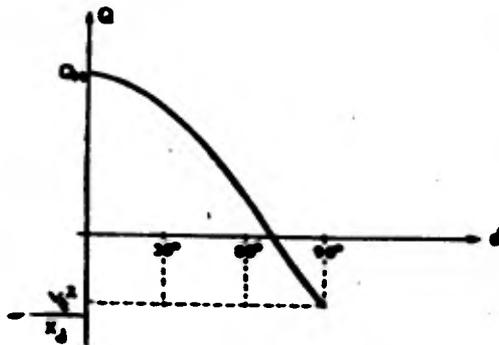
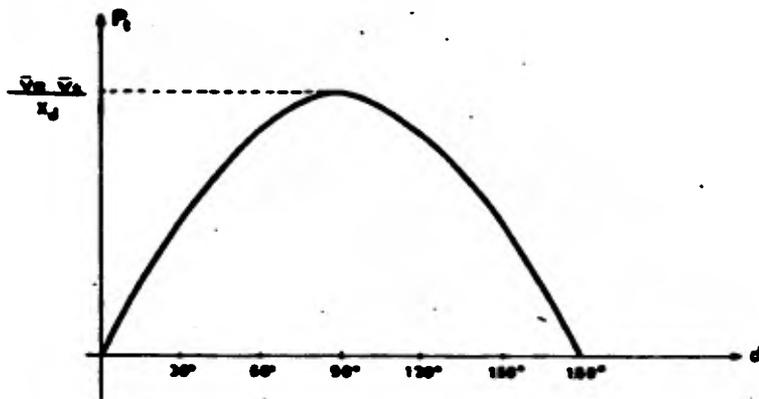
$$s = \frac{\bar{V}_e \cdot \bar{V}_t}{X_d} \text{Sen}\delta + j \frac{1}{X_d} (\bar{V}_e \cdot \bar{V}_t \cos\delta - V_t^2)$$

De donde sabemos que la potencia activa y la potencia reactiva es igual a:

$$P = \frac{\bar{V}_e \cdot \bar{V}_t}{X_d} \text{ Sen } \delta \quad (\text{Parte real de } S)$$

$$Q = \frac{1}{X_d} (\bar{V}_e \cdot \bar{V}_t \text{ Cos } \delta - \bar{V}_t^2) \quad (\text{Parte imaginaria de } S)$$

Para encontrar la potencia máxima que aporta la máquina de rotor cilíndrico lo obtenemos cuando el ángulo de potencia  $S$  es igual a  $90^\circ$  en la potencia activa y el ángulo de potencia  $S$  es igual a cero, grados para la potencia reactiva como se muestra en las siguientes figuras:

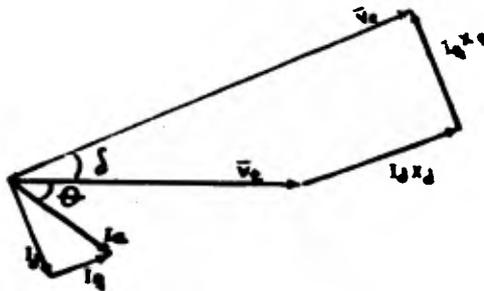


### MAQUINA SINCRONA DE POLOS SALIENTES.

Para la máquina síncrona de polos salientes, los conceptos anteriores no son del todo aplicables, puesto que al no ser el entrehierro uniforme la reluctancia será mayor en el eje en cuadratura (q) es decir.

$$X_d > X_q$$

El diagrama vectorial de la máquina de polos salientes analizado en el capítulo anterior es:



Partiendo del diagrama vectorial y de las siguientes condiciones que en el ángulo  $\delta$  es mayor que cero y también el ángulo de la tensión  $V_e$  es mayor que el ángulo del fasor de la tensión  $V_t$  y además.-

$$X_d \neq X_q$$

El voltaje terminal será:

$$\bar{V}_t = \bar{V}_e - jX_d I_d - jX_q I_q$$

Donde  $V_t$  es el fasor de referencia, por consiguiente,

$$V_e = \bar{V}_e \xi^j$$

y la corriente es:

$$I = I_d + jI_q = \bar{I}_d \xi^{jd} + \bar{I}_q \xi^{jq}$$

por otro lado sabemos que la potencia aparente es:

$$S = V_t I^*$$

\* Indica conjugado

y respecto a la corriente observamos de la fig. los argumentos "q" y "d".

$$q = \delta$$

por estar en fase la componente de la corriente  $I_q$  con la -- tensión  $V_e$ .

$$d = q - \pi/2 = \delta - \pi/2$$

de la fig. podemos obtener cada uno de los módulos de las componentes de la corriente:

$$\bar{V}_t \text{ Sen } \delta = I_q X_q ; \quad I_q = \frac{V_t \text{ sen } \delta}{X_q}$$

y de la misma forma tenemos:

$$\bar{V}_e = \bar{V}_t \text{ Cos } \delta + X_d I_d$$

despejando  $I_d$ :

$$I_d = \frac{\bar{V}_e - \bar{V}_t \text{ Cos } \delta}{X_d}$$

Ahora procedemos a sustituir en la ecuación de la corriente cada uno de sus componentes pero en función de sus términos conjugados.

$$I^* = I_d e^{-j(\delta - \pi/2)} + I_q e^{-j}$$

$$I^* = I_d e^{j(\pi/2 - \delta)} + I_q e^{-j}$$

Sustituyendo en la expresión del conjugado de la corriente cada módulo que la componen obtenemos.

$$I^* = \frac{I}{X_d} (\bar{V}_e - \bar{V}_t \cos \delta) e^{j(\pi/2 - \delta)} + \frac{I}{X_q} (\bar{V}_t \sin \delta) e^{-j\delta}$$

y como:  $\bar{V}_t = \bar{V}_t e^{jt}$

pero  $e^{jt} = 0$  (por ser referencia)

$$S = \frac{\bar{V}_t \bar{V}_e - \bar{V}_t^2 \cos \delta}{X_d} e^{j(\pi/2 - \delta)} + \frac{\bar{V}_t^2 \sin \delta}{X_q} e^{-j\delta}$$

Pasando las funciones exponenciales a su forma cartesiana y como ya se demostró en la sección anterior el término trigonométrico de la expresión de Euler.

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

$$e^{-j\delta} = \cos \delta - j \sin \delta$$

En la ecuación de la potencia sustituimos:

$$S = \frac{\bar{V}_t \bar{V}_e - \bar{V}_t^2 \cos \delta}{X_d} (\text{Sen } \delta + j \text{Cos } \delta) + \frac{\bar{V}_t^2 \text{Sen } \delta}{X_q} (\text{Cos } \delta - j \text{Sen } \delta)$$

Desarrollando y agrupando términos reales e imaginarios tenemos:

$$S = \frac{\bar{V}_t \bar{V}_e}{X_d} \text{Sen } \delta - \frac{\bar{V}_t^2}{X_d} \text{Sen } \delta \text{ Cos } \delta + \frac{\bar{V}_t^2}{X_q} \text{Sen } \delta \text{ Cos } \delta + j \left( \frac{\bar{V}_t \bar{V}_e}{X_d} \text{Cos } \delta - \frac{\bar{V}_t^2}{X_d} \text{Cos}^2 \delta - \frac{\bar{V}_t^2}{X_q} \text{Sen}^2 \delta \right)$$

Para simplificar la expresión de la potencia recurrimos a las identidades trigonométricas siguientes:

$$\text{Sen } \delta \text{ Cos } \delta = \frac{1}{2} \text{Sen } 2\delta$$

$$\text{Cos}^2 \delta = \frac{1}{2} + \frac{\text{Cos } 2\delta}{2}$$

$$\text{Sen}^2 \delta = \frac{1}{2} - \frac{\text{Cos } 2\delta}{2}$$

Sustituyendo cada una de ellas.-

$$S = \frac{\bar{V}_t \bar{V}_e}{X_d} \text{Sen } \delta + \frac{\bar{V}_t^2}{2} \frac{(X_d - X_q)}{X_d X_q} \text{Sen } 2\delta + j \left( \frac{\bar{V}_t \bar{V}_e}{X_d} \text{Cos } \delta - \frac{\bar{V}_t^2}{2} \frac{X_d + X_q}{X_d X_q} + \frac{\bar{V}_t^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \text{Cos } 2\delta \right)$$

Expresando la potencia aparente en su parte real y su parte imaginaria.

$$P = \frac{\bar{V}_t \bar{V}_e}{X_d} \text{Sen } \delta + \frac{\bar{V}_t^2}{2} \frac{(X_d - X_q)}{X_d X_q} \text{Sen } 2\delta$$

$$Q = \frac{\bar{V}_t \bar{V}_e}{X_d} \text{Cos } \delta - \frac{\bar{V}_t^2}{2} \frac{X_d + X_q}{X_d X_q} + \frac{\bar{V}_t^2}{2} \frac{(X_d - X_q)}{X_d X_q} \text{Cos } 2\delta$$

Recordando la ecuación general de las máquinas síncronas podemos expresar la potencia aparente de una máquina de polos salientes de la forma siguiente.-

$$S = A+B+C$$

Donde:

$$A = \frac{\bar{V}_t^2}{2} \frac{X_d + X_q}{X_d X_q} = \frac{\bar{V}_t^2}{2} \frac{\Sigma X_d \cdot q}{\Pi}$$

$$B = \frac{\bar{V}_t^2}{2} \frac{(X_d - X_q)}{X_d X_q} = \frac{\bar{V}_t^2}{2} \frac{\Delta}{\Pi} X_d \cdot q$$

$$C = \frac{\bar{V}_t \bar{V}_e}{X_d}$$

De igual forma que para una máquina de rotor cilíndrico podemos determinar el diagrama de capacidad para una máquina de polos salientes como se muestra en la figura siguiente.



## CAPITULO IV

## COMPARACION DE OPERACION Y COMPORTAMIENTO DE LOS GENERADORES SINCRONOS.

La diferencia de operación de los generadores síncronos la observamos en la potencia que aporta cada una de las máquinas.

En el capítulo anterior deducimos la potencia "S" que aporta la máquina de rotor cilíndrico es:

$$S = \frac{\bar{V}_e \cdot \bar{V}_t}{X_d} \text{ Sen } \delta + j \frac{1}{X_d} (\bar{V}_e \cdot \bar{V}_t \text{ Cos } \delta - \bar{V}_t^2)$$

De donde la potencia activa es:

$$P = \frac{\bar{V}_e \cdot \bar{V}_t}{X_d} \text{ Sen } \delta \quad (\text{Parte real})$$

y la potencia reactiva es:

$$Q = \frac{1}{X_d} (\bar{V}_e \cdot \bar{V}_t \text{ Cos } \delta - \bar{V}_t^2) \quad (\text{parte imaginaria})$$

$$Q = \frac{\bar{V}_e \cdot \bar{V}_t}{X_d} \text{ Cos } \delta - \frac{\bar{V}_t^2}{X_d}$$

El primer término:

$$\frac{\bar{V}_e \cdot \bar{V}_t}{X_d} \text{ Cos } \delta$$

Representa la potencia reactiva producida por la máquina, proporcional a la f.e.m.  $V_e$  que genera el arrollamiento - inductor.

Y el segundo término:  $\frac{\bar{V}_t^2}{X_d}$

Es la potencia reactiva que exige la imantación del -- circuito magnético de la máquina.

La potencia aportada por la máquina de polos salientes:

$$S = \frac{\bar{V}_t \bar{V}_e}{X_d} \text{ Sen } \delta + \frac{\bar{V}_t^2}{2} \frac{(X_d - X_q)}{X_d X_q} \text{ Sen } 2\delta + j \left[ \frac{\bar{V}_t \bar{V}_e}{X_d} \text{ Cos } \delta - \frac{\bar{V}_t^2}{2} \frac{(X_d + X_q)}{X_d X_q} + \frac{\bar{V}_t^2}{2} + \frac{\bar{V}_t^2}{2} \frac{(X_d - X_q)}{X_d X_q} \text{ Cos } 2\delta \right]$$

Expresándola en su parte real tenemos:

La potencia activa:

$$Q = \frac{\bar{V}_t \bar{V}_e}{X_d} \text{ Sen } \delta + \frac{\bar{V}_t^2}{2} \frac{(X_d - X_q)}{X_d X_q} \text{ Sen } 2\delta$$

y su parte imaginaria:

La potencia reactiva:

$$Q = \frac{\bar{V}_t \bar{V}_e}{X_d} \text{ Cos } \delta - \frac{\bar{V}_t^2}{2} \frac{(X_d + X_q)}{X_d X_q} + \frac{\bar{V}_t^2}{2} \frac{(X_d - X_q)}{X_d X_q} \text{ Cos } 2\delta$$

De fórmula nos dice: Las máquinas síncronas de polos - salientes la potencia activa tiene dos componentes:

Una componente fundamental:

$$\frac{\bar{V}_t \bar{V}_e}{X_d} \text{ Sen } \delta$$

Y otro adicional denominado potencia del par de reluctancia:

$$\frac{V_t^2}{2} \frac{(X_d - X_q)}{X_d X_q} \text{ Sen } 2 \delta$$

Puede verse de las ecuaciones de la potencia activa -- que para la corriente del campo constante, ésto es para  $V_e$  constante, la potencia y el par motor de la máquina síncrona dependen solamente del ángulo  $\delta$  .

También dichas ecuaciones muestran que, cuando la corriente de campo es cero, es decir,  $V_e = 0$ , la potencia y el par motor de la máquina de rotor cilíndrico es cero mientras que la potencia del par motor de la máquina de polos salientes no es cero, sino que tiene un valor definido.

La última máquina es capaz de producir una potencia - del par motor sin excitación del campo, esta potencia del -- par motor depende de la diferencia entre la reluctancia en -- ambos ejes directos y en cuadratura ( $X_d$  y  $X_q$ ). Y es independiente de la f.e.m. de excitación  $V_e$ .

Característica Potencia Angulo par; según acabamos de deducir tanto la máquina de rotor cilíndrico como la de polos

salientes la potencia en bornes es una función, más o menos simple, del ángulo par  $\delta$ . Admitiendo constantes la tensión en bornes y la excitación y aceptando despreciable la resistencia de los devanados del estator, la representación gráfica de esta función es una senoide, en el caso de la máquina de rotor cilíndrico, como se muestra en la Fig. (IV-1)

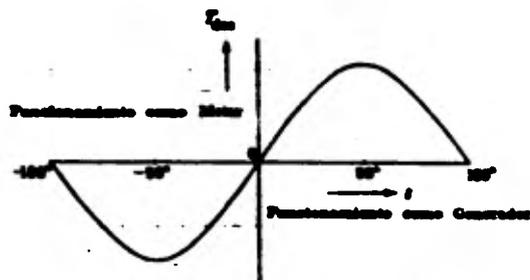


FIG. 1 Característica por motor ángulo de una máquina de rotor cilíndrico

En tanto que en la máquina de polos salientes es una curva suma de la senoide anterior y de otra senoide de frecuencia doble, como se muestra en la Fig. (IV-2)

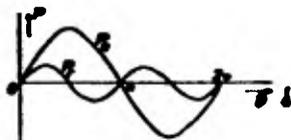


FIG. 2 Característica  $P = f(\delta)$ , en la máquina

síncrona de polos salientes:

$P_e$  = Potencia debida al par electromagnético.

$P_r$  = Potencia debida al par de reluctancia.

De estas dos componentes de potencia, cuantitativamente, la primera es la más importante, en tanto que en la segunda introduce el efecto de los polos salientes y representa el hecho físico de que la onda de flujo en el entrehierro produce un par que tiende a alinear a los polos en la posición de mínima reluctancia.

Este sumando es la potencia correspondiente al par de reluctancia, en el cual, es independiente de la excitación -- del inductor. Incluso sin excitación alguna en el inductor -- ( $V_e = 0$ ), esta componente de la potencia de la máquina síncrona de polos salientes no es nula.

En la máquina de rotor cilíndrico, al no tener dirección de magnetización preferente,  $X_d = X_q$ , el par de reluctancia es nulo y la ecuación de la potencia se reduce al primer sumando.

Cabe señalar con todo que para una máquina normalmente excitada el efecto de los polos salientes supone solo un pequeño porcentaje de aumento de la potencia. Solamente con bajas excitaciones el par de reluctancia adquiere cierta impor-

tancia. Exepto pues, para estas bajas excitaciones, o cuando se requieran resultado muy exacto, en el estudio de la máquina de polos salientes por lo general se aplica, la teoría -- más simple del rotor cilíndrico.

Si se toma en consideración todo el campo posible de variación del ángulo  $\delta$ , la curva "P" en función de  $\delta$ , se hace periódico con valores positivos y negativos. Las partes positivas de P ( $0 < \delta < \pi$ ;  $2\pi < \delta < 3\pi$ , etc.) corresponden al funcionamiento como generador, en tanto que en las partes negativas ( $-\pi < \delta < 0$ ;  $\pi < \delta < 2\pi$  etc.) corresponden al funcionamiento como motor.

Si por exceder el par resistente al par motor pierde la máquina su velocidad de sincronismo, el ángulo  $\delta$  aumenta ó disminuye continuamente y la máquina pasa alternativamente del funcionamiento como generador al funcionamiento como motor, lo que hace obligado el desconectar la máquina de la red y proceder a una nueva maniobra de sincronización.

Otras diferencias que existen entre la máquina de rotor cilíndrico y la máquina de polos salientes, son las características de potencia activa máxima y la potencia reactiva máxima.

Las cuales analizaremos enseguida.

Consideraremos en primer término la máquina de rotor cilíndrico, para lo cual haremos referencia a la ecuación --- de la potencia activa de la máquina.

$$P = \frac{V_e \cdot V_t}{X_d} \text{ Sen } \delta$$

De la ecuación observamos que para la potencia activa sea máxima positiva, será cuando:

El Sen sea igual a la unidad, es decir:

$$\text{Sen } \delta = 1 ; \delta = \pi/2$$

De lo anterior:

$$P_{\text{max (+)}} = \frac{V_e \cdot V_t}{X_d}$$

Y ahora para obtener la potencia reactiva máxima en la máquina de rotor cilíndrico, mencionaremos la ecuación de potencia reactiva para esta máquina:

$$Q = \frac{V_e \cdot V_t}{X_d} \text{ Cos } \delta - \frac{V_t^2}{X_d}$$

Observamos que la ecuación tendrá su máximo valor positivo cuando el Cos  $\delta$  sea igual a uno, y esto se logra cuan

do el ángulo  $\delta$  es igual a cero grados.

$$\cos \delta = 1 \quad ; \quad \delta = 0^\circ$$

Sustituyendo los valores en la ecuación obtenemos:

$$Q_{\max}^{(+)} = \frac{V_e \cdot V_t}{X_d} - \frac{V_t^2}{X_d}$$

Obtenidas las potencias activas y reactivas máximas en sus valores positivos y negativos los representaremos gráficamente en el diagrama circular de dicha máquina, para una mejor comprensión y facilitar la comparación con la máquina de polos salientes.

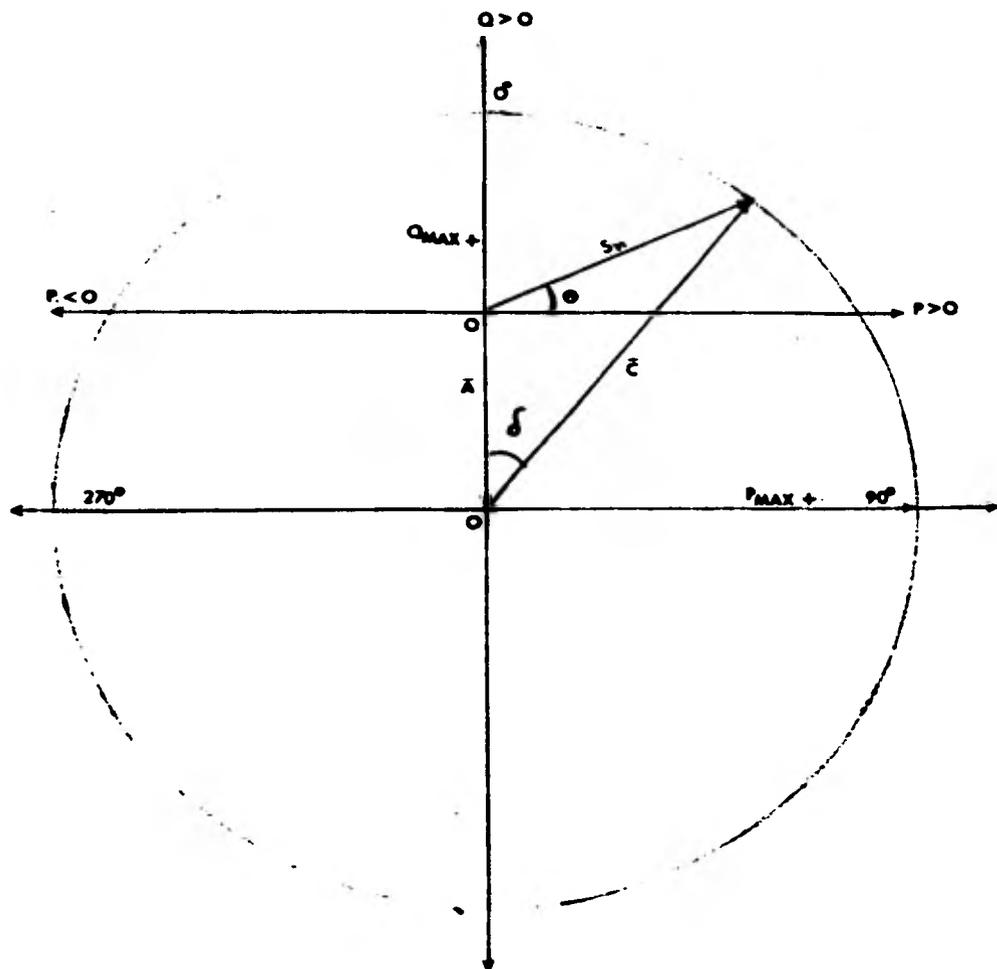


Fig. W.3

Gráfica de las Potencias Activas y Reactivas  
Máximas para un Generador Síncrono Rotor Cilíndrico.

Por lo que respecta a la potencia activa y reactiva -- máximas, de la máquina de polos salientes, los analizaremos - en forma similar a la consideración hecha para la máquina de rotor cilíndrico.

La potencia activa para la máquina de polos salientes es:

$$P = \frac{V_e \cdot V_t}{X_d} \text{ Sen } \delta + \frac{V_t^2}{2} \frac{(X_d - X_q)}{X_d X_q} \text{ Sen } 2 \delta$$

Y la potencia reactiva:

$$Q = \frac{V_e \cdot V_t}{X_d} \text{ Cos } \delta - \frac{V_t^2}{2} \frac{(X_d + X_q)}{X_d - X_q} + \frac{V_t^2}{2} \frac{(X_d - X_q)}{X_d X_q} \text{ Cos } 2 \delta$$

De esta última ecuación vemos que para obtener la potencia reactiva máxima positiva es necesario que el ángulo de potencia  $\delta$  tome el valor de cero grados.

$$\text{Cos } \delta = \text{Cos } 2 \delta = 1; \quad \delta = 0^\circ$$

De la condición descrita obtenemos:

$$Q_{\max(+)} = - \frac{V_t^2}{2} \frac{(X_d + X_q)}{X_d X_q} + \frac{V_t^2}{2} \frac{(X_d - X_q)}{X_d X_q} + \frac{V_e \cdot V_t}{X_d}$$

Ahora para conocer la potencia activa máxima tendremos que derivar la ecuación de la potencia activa descrita anteriormente con respecto al ángulo  $\delta$ , e igualar a cero, para

encontrar el valor del ángulo que maximiza la ecuación, porque a simple vista no se aprecia este valor como en las ecuaciones anteriores. Para facilitar las operaciones de dicha ecuación representaremos la potencia activa en su forma de fasores:

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

No tomamos en cuenta el fasor  $\bar{A}$  por no ser función del ángulo, por lo tanto:

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

$$P_{\text{max}} = 0 = 2 \bar{B} \text{ Cos } 2\delta + \bar{C} \text{ Cos } \delta$$

Sustituyendo el término de  $\text{Cos } 2\delta$  por su identidad trigonométrica.

$$\text{Cos } 2\delta = 2 \text{ Cos}^2 \delta - 1$$

Este valor en la ecuación de  $P_{\text{max}}$ , queda como:

$$P_{\text{max}} = 0 = 2 \bar{B} (2 \text{Cos}^2 \delta - 1) + \bar{C} \text{ Cos } \delta$$

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

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

Expresión que es de la forma de la ecuación cuadrática y cuya solución es:

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

Sustituyendo valores tenemos:

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

De esta última ecuación obtenemos los valores positivos y negativos del  $\cos \delta$ . Como la máquina síncrona trabaja como generador, el valor de  $\cos \delta$  que nos interesa es el valor positivo. Puesto que el valor  $\cos \delta$  negativo corresponde a la máquina síncrona trabajando como motor.

Conocidas las potencias máximas positivas, las representaremos en el diagrama circular. No representando la potencia activa máxima, por no haber el valor numérico del ángulo  $\delta$ , dicho punto analizado con un ejemplo más adelante.

Para la construcción del diagrama circular para este caso de la máquina de rotor de polos salientes, es conveniente hacer notar que el fasor  $\bar{A} = \frac{Vt^2}{2} \frac{(X_d + X_q)}{X_d X_q}$  siendo constante y en la dirección negativa del eje Q.

El fasor  $\bar{B} = \frac{Vt^2}{2} \frac{(X_d - X_q)}{X_d X_q}$  vemos que cambia de direc---

ción según el ángulo de potencia y con módulo constante, por último el fasor  $\bar{C}$  no tiene su centro de giro donde termina el fasor como en el caso de la máquina de rotor cilíndrico, sino que se encuentra dicho centro de giro donde termina el fasor  $\bar{B}$ , el fasor  $\bar{C}$  no se encuentra fijo, ya que se moverá sobre el círculo que describe  $\bar{B}$  de acuerdo al ángulo  $\phi$  varíe.

Para comprender la característica de potencia ángulo - par, y la diferencia de ángulos en la potencia activa máxima, analizaremos por medio de ejemplos el comportamiento de ambas máquinas.

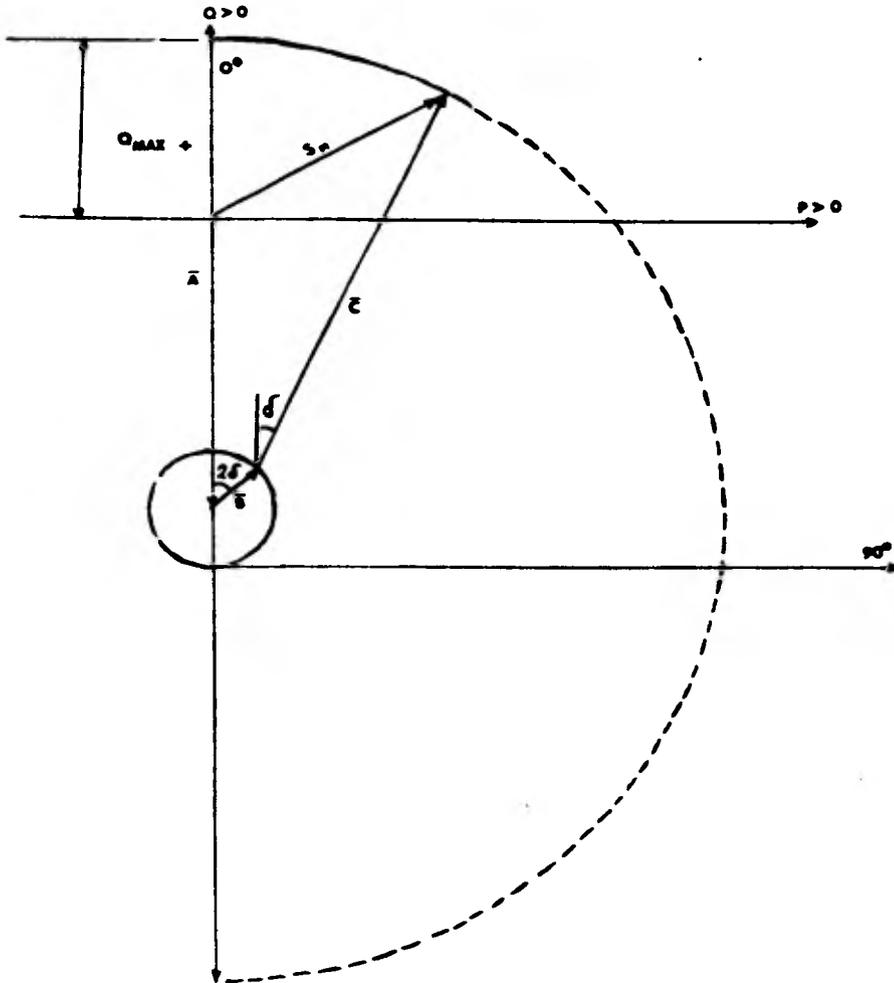


FIG N 4  
 Gráficas de las Potencias Reactivas  
 Máximas Positivas y Negativas para  
 Generador Síncrono Polos Salientes.

Primeramente consideraremos la máquina de rotor cilíndrico conectada a un bus infinito o acoplada a una red de potencia infinita máquina que tiene una tensión en sus terminales y una frecuencia rigurosamente constante cualquiera que sea su excitación o su carga.

Siendo esta tensión igual a la nominal,  $V_t = 1.0$  pu, con una relación de corto circuito  $RCC = 1.0$  y manteniendo una excitación del campo para un factor de potencia unitario de una carga nominal  $I = 1.0$  pu.

Por lo tanto:  $V_t = 1.0$  p . u

Los datos son:  $R_{cc} = 1.0$  ;  $X_d = 1.0$  p.u

Condiciones iniciales de la máquina:

$I = 1.0$  p.u    f.p = 1.0

Del diagrama vectorial de tensiones de la máquina rotor cilíndrico despreciando efecto de saturación, dispersión y resistencia de armadura.

Escribimos:  $\bar{V}_e^{jd} = \bar{V}_t + j\bar{I}X_s = 1.0 + j1.0 = \sqrt{2} \angle 45^\circ$

Angulo de potencia  $\phi$  inicial =  $45^\circ$

Y la fórmula de potencia activa de la máquina rotor --

cilíndrico es:

$$P = \bar{V}_e \bar{V}_t R_{cc} \text{ Sen } \delta$$

Sustituyendo:

$$P = \sqrt{2} \times 1.0 \times 1.0 \text{ Sen } \delta$$

$\delta$  inicial  $45^\circ$

$$P_{\text{inicial}} = \sqrt{2} \text{ Sen } 45^\circ = 1.0 \text{ p.u.}$$

P nominal de la condición nominal.

$$P_{\text{max}} = \sqrt{2} \text{ Sen } 90^\circ = \sqrt{2} \text{ p.u.}$$

La característica de potencia para esta máquina se --  
representa en la Fig.(IV-5) señalada con (1).

Con esta curva podemos observar que al variar el ángulo del par ó ángulo de potencia la máquina puede suministrar mayor potencia, para una misma corriente de excitación, factor de potencia unitario y tensión nominal dados.

Todo dentro del margen de estabilidad (ME) de la máquina, que se define como porcentaje de potencia que la máquina puede entregar de más sin variar su excitación.

$$ME = \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{inicial}}}{P_{\text{max}}}$$

Para este caso tenemos:

$$ME = \frac{\sqrt{2}-1.0}{\sqrt{2}} = 0.293 \approx 0.3 \quad ME = 30\%$$

Para la comparación entre las dos máquinas, ahora calcularemos la característica de potencia para la máquina de -- polos salientes conectada también a un bus infinito y las mismas condiciones de la máquina rotor cilíndrico, además la reactancia en eje de cuadratura.

$$Xq = 0.6 \text{ pu}$$

$$\text{Datos: } Vt = 1.0 \text{ p.u}$$

$$Xd = 1.0 \text{ p.u}$$

$$Xq = 0.6 \text{ p.u}$$

Condiciones iniciales.

$$I = 1.0 \text{ p.u} \quad f.p = 1.0 \quad Pinicial = 1.0 \text{ p.u}$$

Del diagrama vectorial de la máquina de polos salientes despreciando efecto de saturación, dispersión y resistencia de armadura podemos escribir:

$$Ve = Vt \cos \delta + I Xd \sin (\delta + \theta)$$

$$0 = Vt \sin \delta + I Xq \cos (\delta + \theta)$$

Y la característica de potencia está dada por la ecuación.

$$P = \frac{VeVt}{Xd} \sin \delta + \frac{Vt^2}{2} \frac{Xd-Xq}{Xq Xd} \sin 2\delta$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$Q = 0^\circ \text{ del f.p.} = 1$$

$$V_e = 1.0 \cos \delta + 1.0 \sin \delta$$

$$0 = 1.0 \sin \delta - 0.6 \cos \delta$$

De donde:

$$\sin \delta = 0.6 \cos \delta$$

$$\frac{\sin \delta}{\cos \delta} = \tan \delta = 0.6 ; \quad \delta = 31^\circ$$

Valor que sustituimos en la ecuación de la tensión para obtener  $V_e$ .

$$V_e = 1.0 \times 0.857 + 1.0 \times 0.514 = 1.37 \text{ p.u}$$

Sustituyendo el valor de  $V_e$  en la ecuación de la potencia

$$P = 1.37 \sin \delta + \frac{1.0}{2} \frac{1.0 - 0.6}{1.0 \times 0.6} \sin 2\delta$$

$$P = 1.37 \sin \delta + 0.33 \sin 2\delta$$

Para encontrar el ángulo de potencia máxima procedemos a calcular la potencia máxima derivando respecto a  $\delta$  e igualando a cero;

$$\frac{dP}{d\delta} = 0 = 1.37 \cos \delta + 2 \times 0.33 \cos 2\delta$$

De donde,  $\cos 2\delta = (2 \cos^2 \delta - 1)$

$$0 = 1.37 \cos \delta + 0.66 (2 \cos^2 \delta - 1)$$

Agrupando términos; obtendremos una ecuación de segundo grado.

$$1.32 \cos^2 \delta + 1.37 \cos \delta - 0.66 = 0$$

Resolviendo la ecuación:

$$\cos \delta = 0.356$$

Por lo tanto,

$$\delta = 69^\circ$$

En consecuencia la P max, será:

$$P_{\max} = 1.37 \text{ Sen } 69^\circ + 0.33 \text{ Sen } 138^\circ$$

$$P_{\max} = 1.28 + 0.22 = 1.5 \text{ p.u}$$

La curva de característica de potencia está representada en la P, (IV-5) señalada con (2), en dicha curva observaremos que para las mismas condiciones el ángulo de la potencia característica es menor pero obtenemos mayor potencia en la máquina de polos salientes que la de rotor cilíndrico, esto se debe al efecto de la componente de la potencia del par de reluctancia de esta máquina de polos salientes.

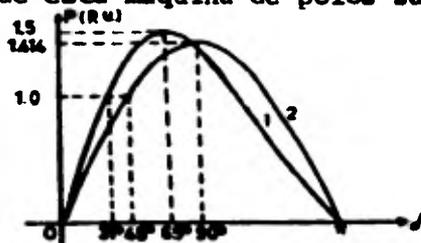


FIG W3 Características de ángulo de potencia de un generador sincrónico (1) de rotor cilíndrico. (2) de polos salientes.

DIAGRAMA DE CAPABILIDAD PARA LA MAQUINA SINCRONA  
ROTOR CILINDRICO.

Del diseño de la máquina síncrona rotor cilíndrico, - sabemos que existen limitaciones que establecen la capacidad de dicha máquina, motivo por el cual, las potencias activas y reactivas máximas representadas en el diagrama circular correspondiente, se encuentran restringidas por dos límites -- térmicos; límite de campo y límite térmico de armadura. Límites térmicos que nos indican cuales son valores máximos reales de potencia activa ó reactiva proporciona una máquina síncrona, sin que se dañen los devanados de campo y armadura, limitaciones que se conocen mediante pruebas en sus componentes.

Para la máquina el límite térmico será el valor que toma la corriente.

Para la máquina síncrona el límite térmico será el valor de la corriente nominal ( $I_n$ ) para la condición de operación en estado permanente, sin considerar las variaciones transitorias.

La diferencia entre el diagrama circular y el diagrama de capacidad es en las limitaciones térmicas que existen en los devanados de campo y de armadura.

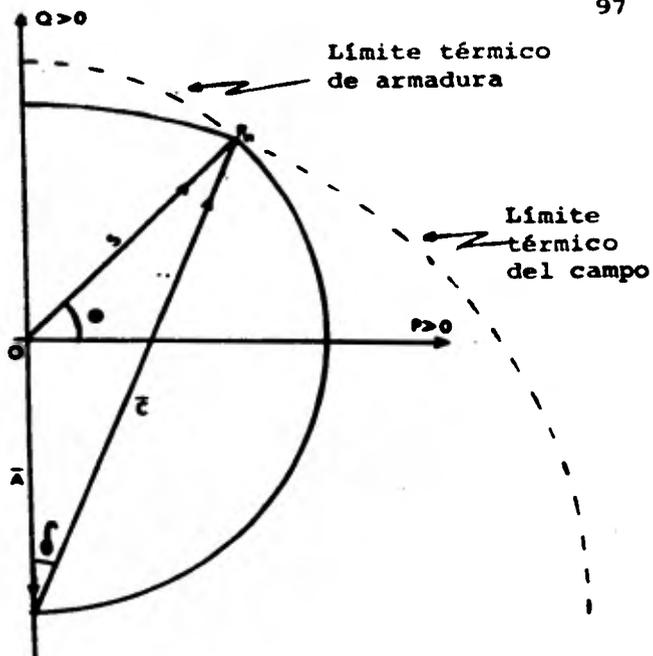


FIG N. 6  
 Diagrama de Capacidad de ---  
 Máquina Síncrona Rotor Cilíndrico.

De la Fig. (IV-6) observaremos que la potencia limitada por la armadura sigue la trayectoria circular con radio igual al módulo de potencia aparente  $S_n$ , con centro en el origen del plano coordenado P-Q, y la potencia limitada por el campo sigue la trayectoria circular con radio igual al módulo del fasor  $\bar{C} = \frac{V_e \cdot V_t}{X_d}$ , y con centro donde termina el fasor  $\bar{A} =$

$$\bar{A} = \frac{V_t^2}{2} \left( \frac{X_d + X_q}{X_d X_q} \right)$$





De la Fig. (IV-8) observamos que la potencia limitada - por la armadura sigue una trayectoria circular con radio igual al módulo de la potencia aparente nominal  $S_n$ , con centro en el origen del plano coordenado P-Q.

La potencia limitada por el campo no sigue una trayectoria circular por la condición descrita en el diagrama circular de dicha máquina polos salientes.

## LIMITACIONES QUE EXISTEN EN LAS MAQUINAS SINCRONAS DEBIDAS AL CALENTAMIENTO.

En los alternadores con rotor cilíndrico, cuando la operación tiende hacia la región del factor de potencia adelantado puede surgir calentamiento en la construcción de extremo de estator, posiblemente con resultados muy serios. El calentamiento lo causan la armadura en rotación y el flujo de pérdida, que cortan las diversas partes metálicas en la estructura de extremo.

Parte del flujo total de pérdida de armadura, es pérdida en el extremo causado por las conexiones de extremo en voladizo.

La trayectoria de este flujo que es siempre a lo largo de la línea de menor reluctancia, varía según el grado de saturación del hierro del rotor y con el ángulo  $\phi$  de potencia.

En operación con factor de potencia adelantado, cuando la excitación es baja y el hierro del rotor no está altamente saturado, la trayectoria para el flujo de pérdida en el extremo, es desde el extremo del núcleo del estator a través de los bucles de conexión en el extremo y, luego, en sentido radial hacia el arillo de sujeción de los campos.

La trayectoria continúa en sentido circunferencial alrededor del arillo de sujeción para un paso de un polo y vuelve al estator por una ruta similar.

El patrón de flujo, gira a velocidad sincrónica y, al hacerlo, corta las diversas partes de hierro de la construcción de extremo del estator y ocasiona que se calienten si la densidad del flujo es elevada. Las laminaciones de extremo -- del núcleo del estator, que pueden tener corrientes parásitas inducidas en el plano de la laminación, también pueden sufrir de este efecto de calentamiento.

El calentamiento se puede volver serio en la región baja excitada cuando el campo sólo está ligeramente saturado, mientras que el campo está saturado por completo, se cambia la configuración del flujo y no surge el problema de calentamiento en el extremo.

En las máquinas de polos salientes no hay ese problema de calentamiento de extremo, debido a la alta reluctancia de la trayectoria de pérdida de flujo.