

Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA



OPERACION DE SISTEMAS DE POTENCIA ELECTRICA

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

Javier Humberto De la Cruz Jasso





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.

OPERACION DE SISTEMAS DE POTENCIA ELECTRICA

El funcionamiento de sistemas de potencia eléctrica - requiere el estudio de las características y comportamiento de las unidades generadoras que producen la energía eléctrica.

Debido a que la demanda de energía eléctrica no permanece constante, el sistema operara en diferentes estados; desde aquellos en que el sistema permanece casi invariable, hasta en los que, debido a variaciones bruscas de carga o fallas eléctricas, el sistema varia notablemente.

El presente trabajo es una breve analisis y descripción de los diversos factores que intervienen en esa serie de desviaciones y ajustes que se desarrollan en el sistema.

En el primer capítulo se hace una descripción en forma general de lo que representa un sistema, así como de las condiciones que debe cumplir para que su operación sea segura, con el propósito de que su funcionamiento sea satisfactorio dentro de ciertos límites.

En el segundo capítulo se desarrollan los principales parametros que caracterizan el funcionamiento del sistema. Se explica mediante ejemplos, el comportamiento de la unidad generadora al presentarse una variación en la demanda de energía eléctrica y como actua el control de generación para corregir esta variación.

Dada la importancia del papel que desempeña el generador dentro del sistema, en el tercer capítulo se hace un estudio del funcionamiento de los principales elementos de que éste consta. Se efectúa también el análisis de las ecuaciones que representan el funcionamiento del generador y sus variables principales.

En el cuarto capítulo se efectúa el análisis dinámico del regulador de velocidad. Se plantea el problema de obtener una representación matemática, a través de la transformada de Laplace, del comportamiento físico del sistema de control de generación. Es decir se obtiene la función de transferencia del sistema, cuyos parámetros son funciones del tiempo.

Por último se explica el funcionamiento de algunos de los tipos más comunes de reguladores empleados en los sistemas de potencia.

Cabe aclarar que todos los análisis y descripciones desarrolladas, se efectúan considerando al sistema en estado estable y que además todos los elementos que intervienen son lineales e invariantes.

OPERACION DE SISTEMAS DE POTENCIA ELECTRICA

TEMARIO

- 1.- Generalidades de Operación de un Sistema.
- 2.- Control de la Frecuencia de un Sistema. Estatismo.
- 3.- Características y Operación de la Máquina Síncrona.
- 4.- Características y Operación del Regulador de Velocidad.

DEFINICION DE SISTEMA

El término "Sistema" es ampliamente utilizado. Al respecto, es fácil escuchar expresiones tales como "El Sistema Económico", "El Sistema Métrico Decimal", "Derrocar el Sistema", "El Sistema Eléctrico Central", etcétera, por lo que surge la pregunta: ¿Qué es un Sistema?

Sistema es un conjunto de elementos (componentes físicos) conectados o relacionados entre si de tal manera que forman y/o actúan como una unidad dinámica completa, para desarrollar un propósito determinado.

Desgraciadamente el sistema es vulnerable puesto que si una de sus partes sufre una alteración, el sistema puede afectarse hasta en forma catastrófica.

El Sistema Eléctrico de potencia (o energía) sirve para producir (generar) energía eléctrica que los consumidores (la carga) absorben.

La conducción de la energía eléctrica desde la generación hasta la carga se realiza a través de la Red de Potencia Eléctrica. (ver figura 1).

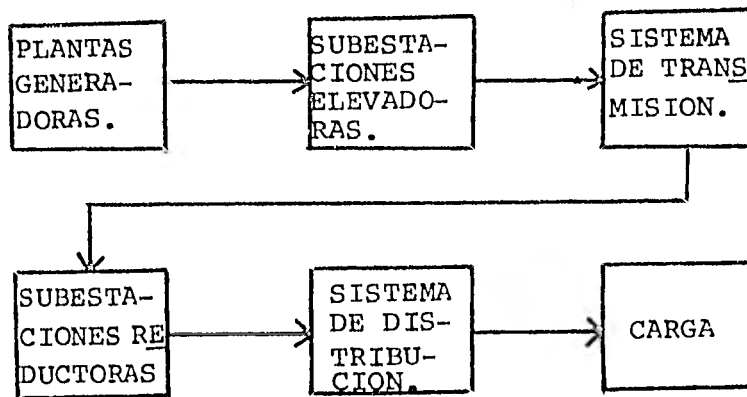


FIG. 1 Representación esquemática de un Sistema de Energía Eléctrica.

La carga global de un sistema está constituida por un gran número de cargas individuales de diferentes clases (Industrial, Comercial, Residencial).

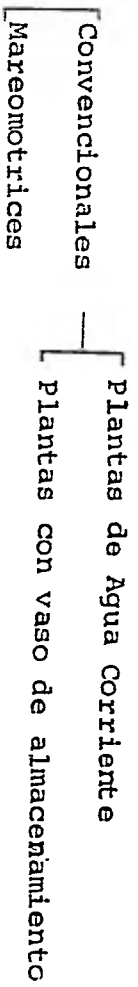
FUENTES DE ENERGIA

La energía eléctrica suministrada por un sistema eléctrico procede principalmente de alguna de las siguientes fuentes:

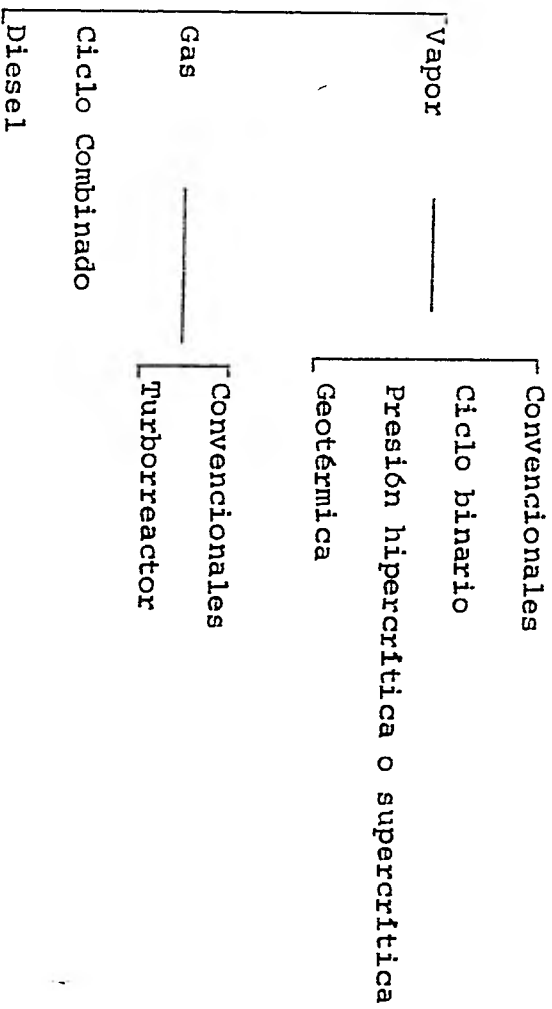
- Aprovechamiento de caídas de agua.
- Combustibles fósiles (petróleo, gas natural, carbón).
- Fisión nuclear.

CLASIFICACION PLANTAS GENERADORAS

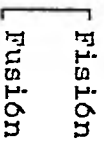
1) Plantas Hidroeléctricas



2) Plantas Termoelectricas



3) Plantas Nucleoelectricas



Existen otras fuentes tales como la energía geotérmica y las mareas cuyo desarrollo aún no se logra plenamente. -
Otras fuentes en proceso de desarrollo son el viento y la energía solar.

CALIDAD DEL SERVICIO

El suministro de energía eléctrica debe realizarse -
con una calidad adecuada, de manera que los aparatos que utilizan la energía eléctrica funcionen correctamente.

Los requerimientos que demanda el servicio eléctrico-
son, independientemente de su tamaño y complejidad, los siguientes:

Continuidad

Calidad

— [Regulación de voltaje
Control de la frecuencia

Economía

CONTINUIDAD DEL SERVICIO

La energía ha adquirido tal importancia en la vida -
moderna, que una interrupción de su suministro causa trastornos y pérdidas económicas insoportables (como por ejemplo el disturbio que se presentó el día 15 de Enero de 1981, en el Sistema -
interconectado del sur, donde 6'171,291 usuarios fueron afecta-

dos, con una demanda máxima interrumpida de 4,933.2 - MW -).

El concepto de continuidad llevado a su interpretación extrema se destruye a si mismo. En condiciones de operación crítica, esto es cuando la demanda es superior a la capacidad si se pretendiera conservar esa continuidad, el sistema perecería. En tales circunstancias se adoptan medidas que disminuyan la demanda, ya sean de tipo general, reduciendo frecuencia y voltaje. O bien, ocasionando interrupciones a determinados consumidores. En el primer caso se disminuye calidad y en el segundo la continuidad es también reducida, pero el sistema no perece y por esta razón se habla de seguridad del sistema.

Para asegurar la continuidad del suministro deben tomarse las disposiciones necesarias para hacer frente a una falla en algún elemento del sistema. A continuación se mencionan los principales requisitos.

- a) Disponer de la reserva de generación adecuada para hacer frente a la posible salidad de servicio, o - indisponibilidad, a cierta capacidad de genera---ción.
- b) Disponer de un sistema de protección automático - que permita eliminar con la rapidez necesaria cualquier elemento del sistema que haya sufrido una - avería.

- c) Diseñar el sistema de manera que la falla y desconexión de un elemento tenga la menor repercusión - posible sobre el resto del sistema.
- d) Disponer de los circuitos de alimentación de emergencia para hacer frente a una falla en la alimentación normal.
- e) Disponer de los medios para restablecimiento rápido del servicio, disminuyendo así la duración de - las interrupciones, cuando estas no han podido ser evitadas.

CALIDAD

Se refiere a la magnitud permisible de variación de - frecuencia y voltaje.

REGULACION DE VOLTAJE

En relación con el voltaje no es fácil hablar de sus- condiciones a lo largo del sistema. Existe una dependencia del- voltaje con respecto a la frecuencia. Los aparatos que funcio-- nan con energía eléctrica están diseñados para operar a un vol- taje determinado y su funcionamiento será satisfactorio siempre que el voltaje aplicado no varíe más del límite.

CONTROL DE LA FRECUENCIA

La frecuencia eléctrica de un sistema en estado estable, tiene el mismo valor en cualquier parte, desde las terminales de la unidad generadora más grande hasta las terminales del más insignificante usuario.

Esto se debe a que se considera que el sistema es rígido, lo cual rigurosamente no es cierto. Sin embargo en la práctica, se considera que el sistema es suficientemente rígido, para aceptar de esta manera que la frecuencia sea la misma en todas las partes del sistema.

¿Es necesario conservar la frecuencia constante e igual a su valor normal?

Conviene operar el sistema a la frecuencia nominal F_n . Todo el equipo está diseñado para operar a esa frecuencia y por lo tanto para esa frecuencia su operación obtiene su máxima eficiencia. La principal razón para operar el sistema a la frecuencia normal es que sirve de medio para alcanzar una operación económica correcta.

Los sistemas de energía eléctrica funcionan a una frecuencia fija con cierta tolerancia.

Al producirse una variación de la carga conectada al sistema, variará la velocidad de rotación de las máquinas y variará por consiguiente la frecuencia, pudiendo bajar o subir

más alla de la tolerancia.

ECONOMIA

Para satisfacer este requerimiento es indispensable que los anteriores hayan quedado satisfechos o estén muy próximos de su realización.

En un sistema saturado no se puede hablar de economía de producción. Peor es el caso, cuando la capacidad de generación es insuficiente, esto es, que la demanda es mayor que la capacidad disponible y que se requiere para igualar ambos términos, sacrificar ya sea, la continuidad o la calidad.

Por la importante consideración de seguridad del sistema se prefiere hablar de la optimización de producción en lugar de la economía de operación.

Todo sistema eléctrico consta de generación que alimenta la carga a través de la red. Esto es, la red conduce la energía generada desde las plantas generadoras hasta los centros de utilización, por cuyo motivo ella, la red, consume energía. Por esta razón la optimización de la economía de operación se hace global, esto es en términos del receptor y no en los del productor.

La asignación de generación requerida por todas las unidades de una planta, área o sistema, para obtener la economía óptima; esto es la selección de potencia generada por cada

una de ellas, tiene elementos determinantes así como elementos restrictivos.

Entre los primeros se pueden mencionar la disponibilidad de unidades generadoras, su eficiencia y costo de la materia prima, esto es el costo de los combustibles fósiles y nucleares y potencial hidráulico. También entre estos elementos determinantes se encuentra la configuración de la red en términos de sus inherentes pérdidas.

Entre los elementos restrictivos se pueden mencionar los requerimientos de reserva dictados por el grado de seguridad que se requiera y limitaciones tanto en las unidades generadoras como en los elementos de la red, características del potencial hidráulico y en ocasiones muy importantes la velocidad de desarrollo de carga (como por ejemplo instalaciones siderúrgicas importantes).

II.- CONTROL DE LA FRECUENCIA DE UN SISTEMA.

ESTATISMO

En la Unidad Generadora existen 2 pares, uno mecánico y otro eléctrico; dicho de otra forma, un par motor de la turbina o generador y un par resistente de la carga.

En estado de equilibrio (Estable):

$$T = (+T_M) + (-T_E) = 0$$

$$T_G = T_C$$

La frecuencia tiene un valor constante al ser igual - la potencia generada a la potencia demandada por la carga, más - las pérdidas.

$$\sum P = \sum P + \sum \text{pérdidas}$$

Al ocurrir un cambio de carga en el sistema:

$$T = (+T_M) + (-T_E) \neq 0$$

$$T_{Gi} \neq T_C$$

Lo cual implica que

$$\sum P_{Gi} \neq \sum P_C + \sum \text{pérdidas}$$

Debido al desequilibrio, se produce un par resultante que provoca una aceleración donde

$$T_R \rightarrow \alpha$$

$$\alpha = \frac{T_R}{J}$$

J; Momento de inercia del Sistema.

Esto implica que si el sistema es muy grande, una variación de carga lo alterará menos que en el caso de un sistema pequeño.

La consecuencia inmediata de este desbalance es una oscilación en la velocidad del alternador que se traduce en -- una variación de la frecuencia en el Sistema: disminuye si $P_G < P_c$; aumenta si $P_G > P_c$.

Dado que los sistemas de energía eléctrica son diseñados para funcionar a una frecuencia determinada, con un pequeño rango de tolerancia en la variación de esta, existe la necesidad de un control que restablezca las condiciones iniciales, ya que si la adaptación de la generación a la carga se -- hace solo por la autorregularización del sistema, la variación de frecuencia pasaría el límite de tolerancia.

Debido a que el cambio de carga es aleatorio, es imposible efectuar un programa eficiente de acoplamiento entre generación y demanda ya que siempre habrá error; por lo que este control deberá ser automático, basado precisamente en estas variaciones de carga. Otra de las razones de la necesidad de un control automático, es que la presencia de una falla en el-

sistema puede sacar del mismo a una o varias unidades, provocando con esto variación de frecuencia, lo cual se corrige con rapidez por el control automático.

Para tal propósito se usa el regulador de velocidad cuya acción es conocida como regulación primaria. Este se encuentra en la turbina y su acción consiste en abrir o cerrar las válvulas de admisión de cada unidad por separado. Abre para que fluya más combustible o vapor, aumentando la generación cuando la frecuencia baja de la fijada de referencia; cierra, reduciendo así la generación, cuando la frecuencia sube.

Finalmente se logra un nuevo estado de equilibrio en el que

$$P_{Gi} + \Delta P_G = P_{ci} + \Delta P_c$$

con lo cual la frecuencia vuelve a ser constante. Sin embargo -- dicha frecuencia es diferente de la inicial o nominal.

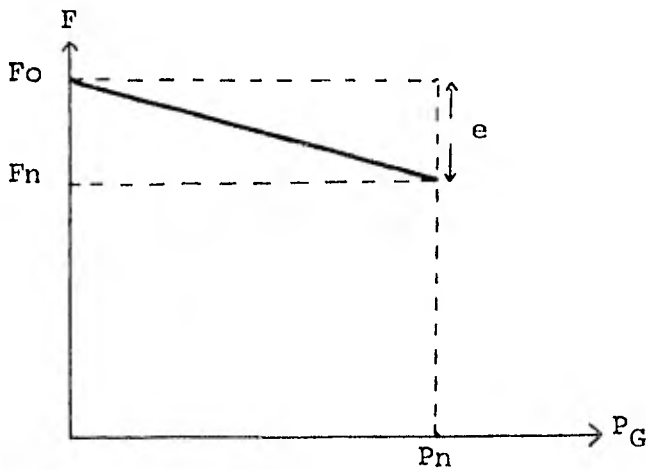
$$F = F_i + \Delta F$$

El restablecimiento de la frecuencia se logra a través de la regulación secundaria, llamada también acelerador; el cual es un dispositivo del propio regulador de velocidad, que aumenta o disminuye la generación según sea el caso de variación de frecuencia.

Para explicar mejor esto veremos antes algunos conceptos que nos ayudarán a entender mejor el fenómeno.

Estatismo (Regulación)

El estatismo de un regulador de velocidad es el cambio en la velocidad angular observando al pasar de carga cero a plena carga.



$$E = \frac{e \text{ (HZ)}}{F_n \text{ (HZ)}} \quad (\text{PU})$$

Donde $e = F_o - F_n$

La magnitud del estatismo se determina por el aumento de velocidad de la unidad cuando esta varía gradualmente su potencia generada desde su valor nominal P_n , a la frecuencia nominal F_n , hasta cero.

La regulación se expresa como

$$R = \frac{e}{F_n} \times 100 (\%)$$

Cuando se trata de primotores se expresa:

$$R = \frac{N_o - N_n}{N_n} \times 100 (\%)$$

Donde

N_o : Velocidad sin carga en la unidad

N_n : Velocidad nominal.

En términos eléctricos:

$$E = \frac{F_o - F_n}{F_n} \quad (\text{pu})$$

Donde

F_o : Frecuencia sin carga en la unidad

F_n : Frecuencia nominal

Por facilidad en el estudio se considera que el estatismo es una línea recta, ya que en realidad es una sucesión -- de pequeñas líneas rectas de, aunque a proximadamente igual, -- diferente pendiente.

CARACTERISTICA DE GENERACION

Se define la característica de generación, también -- llamada energía reguladora, como la relación que existe entre -- una variación de carga y la correspondiente variación de fre -- cuencia.

La característica de generación N_G y el estatismo, -- aunque con diferentes unidades, son 2 formas de explicar lo mismo.

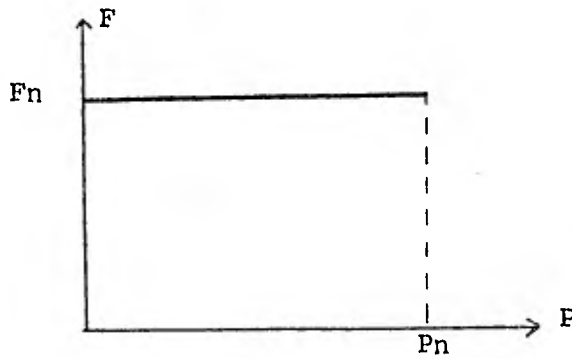
$$N_G = - \frac{\Delta P}{\Delta F} = \frac{1}{R} \quad \left(\frac{Mw}{Hz} \right)$$

El signo negativo es debido a que a un aumento de po -- tencia generada corresponde una disminución de la frecuencia, -- y visceversa.

$$N_G = \frac{\Delta G > 0}{\Delta F < 0} = \frac{+\Delta G}{-\Delta F} = - N_G \quad \left(\frac{Mw}{Hz} \right)$$

La unidad puede tener 2 tipos de características:

1. La característica astática, en la que para una frecuencia existe un número infinito de potencias.



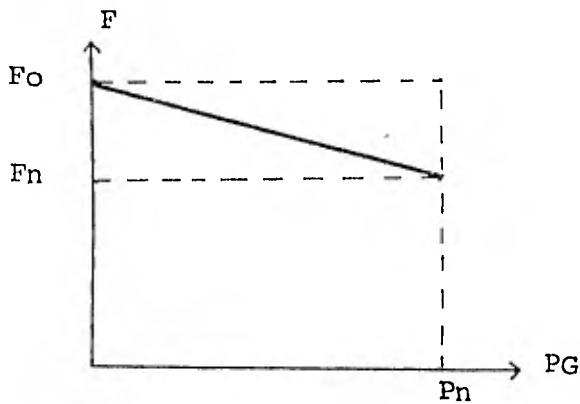
La frecuencia se mantiene constante sin importar la - variación de carga dentro de la capacidad nominal. Obviamente - hay transitorios asociados con el movimiento del mecanismo de - regulación cuando varía de una condición de carga a otra, pero - la acción correctiva es tal que la frecuencia se mantiene en el mismo valor.

Esta característica es utilizada para cargas aisladas ya que su funcionamiento en paralelo originaría fluctuaciones - de la frecuencia debido a la falta de sincronización de los reguladores de velocidad de las máquinas.

2. La característica estática , en la cual para cada valor de la frecuencia hay un valor de potencia, es decir que - la frecuencia cambia al cambiar la carga.

La operación en paralelo de generadores síncronos requiere que sus reguladores de velocidad tengan característica -

estática.



La pendiente inversa esta dada por:

$$N_G^{-1} = \frac{F_o - F_n}{P_n} = \frac{e}{P_n} \Rightarrow N_G = \frac{P_n}{e}$$

Multiplicando ambos términos por F_n

$$N_G = \frac{P_n}{e} \frac{F_n}{F_n} = \frac{P_n}{E F_n} \quad \left(\frac{\text{Mw}}{\text{Hz}} \right)$$

Donde

N_G : Característica de generación

P_n : Potencia nominal de la unidad

E : Estatismo en p.u.

F_n : Frecuencia nominal

La característica de generación N_G es igual a la suma de las características de las máquinas que forman el sistema.

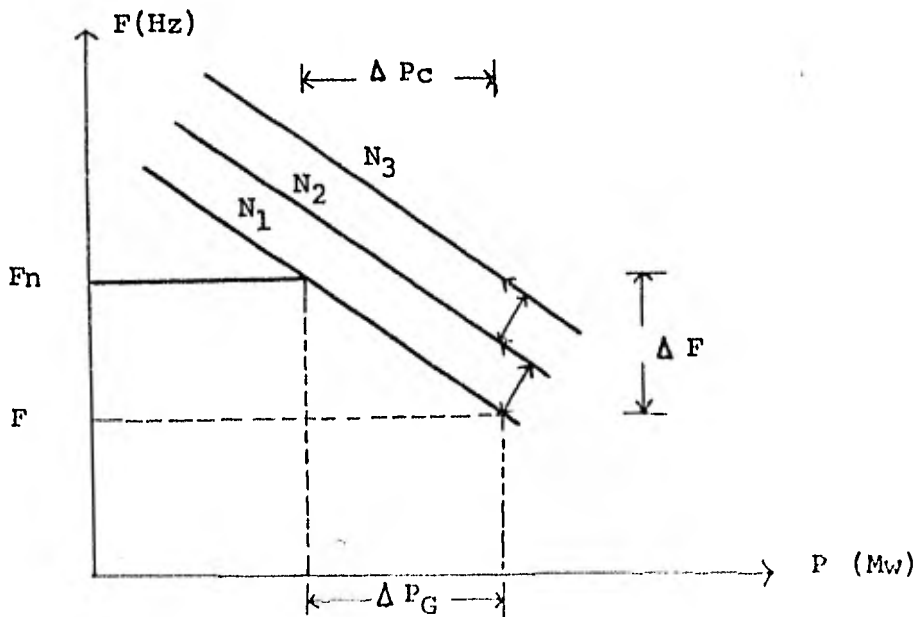
$$N_G = \frac{\Delta P_1}{\Delta F} + \frac{\Delta P_2}{\Delta F} + \dots + \frac{\Delta P_n}{\Delta F}$$

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

$$N_G = \sum_{i=1}^n N_{Gi} \left(\frac{Mw}{Hz} \right)$$

Ahora, ya con los conceptos anteriores, procederemos a explicar lo que sucede en el sistema al ocurrir un cambio de carga.

Para facilidad de análisis supondremos una sola unidad generadora y una sola carga.



La unidad se encuentra generando a la frecuencia nominal, a la potencia inicial; al haber un cambio de carga, un aumento en este caso, por la acción del regulador de velocidad o regulación primaria, la potencia de generación aumenta siguiendo la característica de generación N_1 hasta llegar al punto 1. En este punto se consigue un nuevo estado de equilibrio, sin embargo la frecuencia es menor que la nominal, por lo que el acelerador o regulación secundaria actúa siguiendo una característica de generación paralela a N_1 , siendo esta N_2 ; estando en el punto 2, el regulador nota el aumento de generación por lo que cierra la admisión al primotor y la generación se reduce siguiendo la característica de generación N_2 , llegamos al punto 3 en el que se tiene otra vez un estado de equilibrio; esta acción sin embargo aun no nos conduce a la frecuencia nominal, por lo que este proceso se repite, exactamente igual, n veces hasta llegar al estado de equilibrio en el que la frecuencia es la deseada. Para el caso de un aumento de frecuencia, el análisis es, similar, en sentido inverso.

Cabe aclarar que mientras que la acción del regulador de velocidad es rápida, la del acelerador es lenta; evitándose así que las 2 acciones contractúen.

A continuación resolveremos un ejemplo con el propósito de hacer más explícito lo visto hasta ahora.

EJEMPLO:

Tenemos un sistema formado por 3 unidades de 100, 150 y 200 Mw respectivamente, las cuales alimentan la carga de 230 - Mw, a la frecuencia de 60 Hz.

Suponemos que hay un aumento de carga en el sistema - de 100 Mw.

Calcularemos la caída de frecuencia y la generación - resultante.

| U | Pn (Mw) | Pi (Mw) | E (%) |
|---|---------|---------|---------|
| 1 | 100 | 50 | 3 |
| 2 | 150 | 80 | 2 |
| 3 | 200 | 100 | 5 |
| S | 450 | 230 | - |

Cálculo de las características de generación:

$$N_G = \frac{P_n}{E \cdot F_n}$$

$$N_1 = \frac{100}{0.03 \times 60} = 55.56 \quad \frac{\text{Mw}}{\text{Hz}}$$

$$N_2 = \frac{150}{0.02 \times 60} = 125 \quad \frac{\text{Mw}}{\text{Hz}}$$

$$N_3 = \frac{200}{0.05 \times 60} = 66.67 \quad \frac{\text{Mw}}{\text{Hz}}$$

$$N_G = \sum_{i=1}^n N_i = 55.56 + 125 + 66.67 = 247.22 \quad \frac{\text{Mw}}{\text{Hz}}$$

La disminución de frecuencia es de

$$\Delta F = \frac{\Delta P}{N_G} = \frac{100}{247.22} = 0.404 \text{ Hz}$$

La frecuencia final es de

$$F_f = 60 - 0.404 = 59.56 \text{ (Hz)}$$

El aumento de carga se reparte de la siguiente forma entre las unidades.

$$\Delta P_1 = \Delta F \times N_{G1} = 0.404 \times 55.56 = 22.45 \text{ (Mw)}$$

$$\Delta P_2 = \Delta F \times N_{G2} = 0.404 \times 125 = 50.5 \text{ (Mw)}$$

$$\Delta P_3 = \Delta F \times N_{G3} = 0.404 \times 66.67 = 26.94 \text{ (Mw)}$$

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = 100 \text{ Mw}$$

Observamos en este ejemplo que se consigue el nuevo estado de equilibrio a una frecuencia menor de la inicial.

Si en este ejemplo cualquiera de las unidades hubiera estado trabajando a su potencia nominal ($P_i = P_n$), ya fuera-

una o dos de ellas, el descenso de frecuencia hubiera sido mayor; puesto que con un aumento de carga, la unidad que estuviera operando al 100% de su capacidad, no podría participar con las otras en el aumento de generación, teniendo que asimilar la carga las unidades restantes. Por tal razón es conveniente tener a las máquinas trabajando por debajo de su capacidad nominal.

EJEMPLO:

| U | Pn (Mw) | Pi (Mw) | E (%) |
|---|---------|---------|-------|
| 1 | 100 | 80 | 3 |
| 2 | 200 | 100 | 4 |

El incremento de carga es de 70 Mw, características de generación:

$$N_1 = \frac{100}{0.03 \times 60} = 55.56 \left(\frac{\text{Mw}}{\text{Hz}} \right)$$

$$N_2 = \frac{200}{0.04 \times 60} = 83.34 \left(\frac{\text{Mw}}{\text{Hz}} \right)$$

$$N_G = 138.9 \text{ (Mw/Hz)}$$

$$\Delta F = \frac{70}{138.9} = 0.504 \text{ Hz}$$

Frecuencia final

$$F_f = 60 - 0.504 = 59.496 \text{ (Hz)}$$

Repartición del aumento de carga

$$\Delta P_1 = \Delta F \times N_{G1} = 0.504 \times 55.555 = 28 \text{ Mw}$$

$$\Delta P_2 = \Delta F \times N_{G2} = 0.504 \times 83.333 = 42 \text{ Mw}$$

Observamos que la unidad 1 no puede proporcionar la potencia de 28 Mw, ya que dadas las condiciones en que se encuentra trabajando, solo puede suministrar 20 Mw. Vemos en cambio -- que a la unidad 2 aún le sobra capacidad, por lo que resolveremos nuevamente el problema tomando en cuenta la restricción de la máquina 1.

Disminución de frecuencia:

$$\Delta F^1 = \frac{20}{55.55} = 0.36 \text{ Hz}$$

La carga cubierta por la unidad 2 será de

$$\Delta P_2^1 = \Delta F^1 \times N_2 = 0.36 \times 83.33 = 30 \text{ Mw}$$

El sistema absorbe ahora

$$\Delta P_1^1 + \Delta P_2^1 = 20 + 30 = 50 \text{ Mw}$$

Pero el incremento de carga es de 70 Mw y dado que la máquina 1 no puede tomar más carga, la unidad 2 tiene que hacer

se cargo del resto.

$$\Delta G_2 = 70 - 50 = 20 \text{ Mw}$$

y su correspondiente disminución de frecuencia es

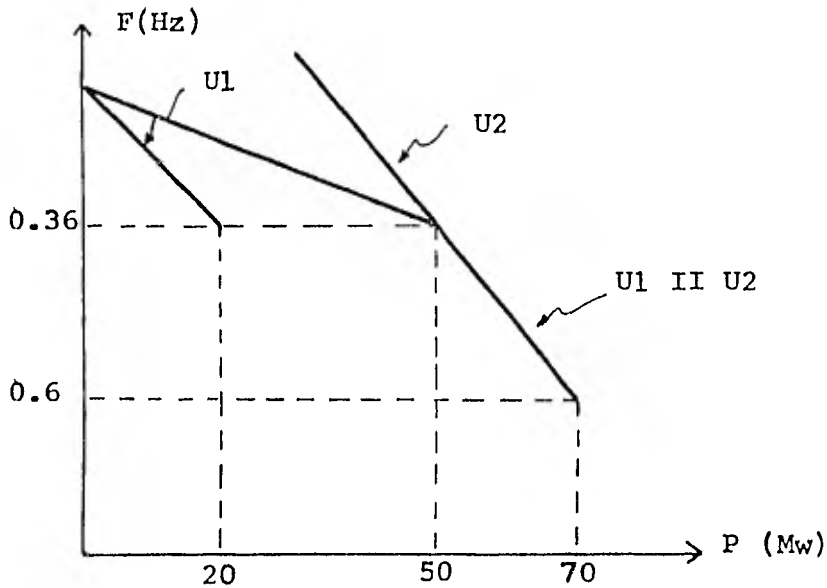
$$\Delta F_{11} = \frac{20}{83.33} = 0.24 \text{ Hz}$$

Por lo que la caída total de frecuencia es de

$$\Delta F = \Delta F^I + \Delta F^{II} = 0.36 + 0.24 = 0.6 \text{ Hz}$$

Tabla de resultados.

| U | Pn (Mw) | Pi (Mw) | E (%) | AG (Mw) | PT (Mw) |
|---|---------|---------|-------|---------|---------|
| 1 | 100 | 80 | 3 | 20 | 100 |
| 2 | 200 | 100 | 4 | 50 | 150 |
| S | 300 | 180 | - | 70 | 250 |



Vemos de la gráfica que la unidad 1 se satura al llegar a 20 Mw por lo que la unidad 2 queda sola con el resto de la carga.

La repartición de carga en un sistema entre las diversas unidades que lo componen, se efectúa en base a sus estatismos:

La unidad con menor estatismo tomará una mayor parte del aumento de carga que la unidad con mayor estatismo.

Si tuvieramos 2 unidades generadoras de igual capacidad y cuyo estatismo fuese el mismo, al presentarse un aumento de carga, debido a que tienen igual estatismo, cada una tomará la mitad del aumento de carga.

Si el estatismo de una de las unidades es cero, esta unidad tomará totalmente el aumento de carga.

En el caso extremo de que el estatismo fuera cero en ambas unidades, la máquina con regulador de velocidad más rápido, tomará el aumento de carga.

Esto representa una inconveniencia ya que es más económico que ambas máquinas se repartan el aumento de generación. Esta es la razón por la cual se tiene siempre un estatismo mayor que cero en los reguladores de velocidad.

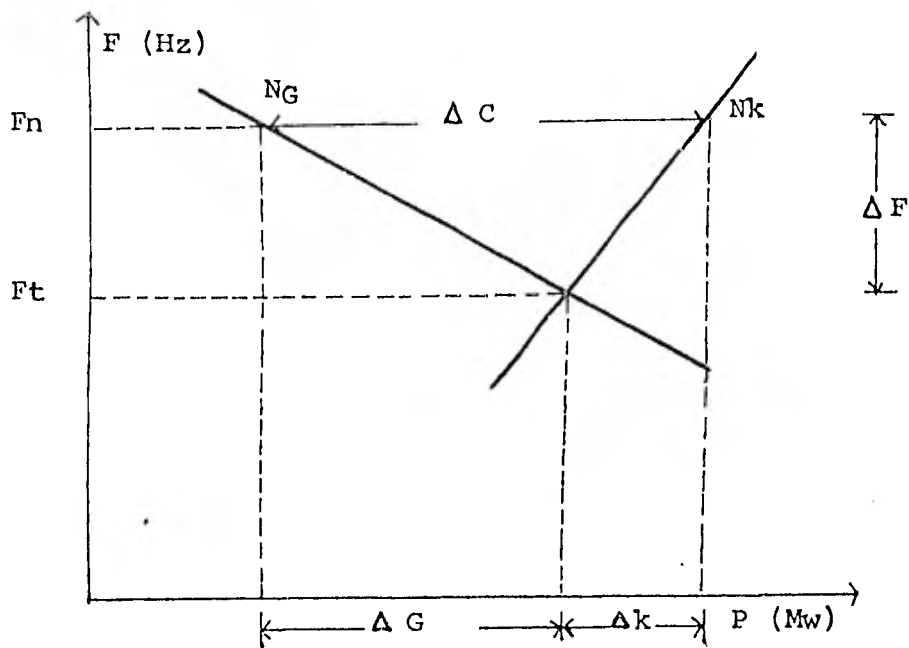
CARACTERISTICAS DEL SISTEMA

La característica del sistema esta compuesta por la característica de generación y por la característica de la carga.

$$N_s = N_G + N_k$$

$$\text{donde } N_k = \frac{\Delta P_k}{\Delta F} \quad \left(\frac{Mw}{Hz} \right)$$

La característica de la carga N_k no la habíamos tomado en cuenta hasta ahora para simplificar el estudio, sin embargo en muchos casos la característica de la carga se combina con la característica de generación para asimilar las variaciones de carga. Esto lo explicaremos más claramente en una gráfica P - F.



Al ocurrir un incremento de carga ΔC en el sistema, - el regulador de velocidad actúa siguiendo la característica de generación NG en forma descendente; dado que la carga es sensible a la frecuencia, entra en acción su característica, ayudando de esta manera a que el sistema recupere sus condiciones iniciales.

Esto significa que debido a la sensibilidad de la carga, el incremento de generación fue menor que el aumento de carga, ya que la carga, debido a su sensibilidad, se amortigua.

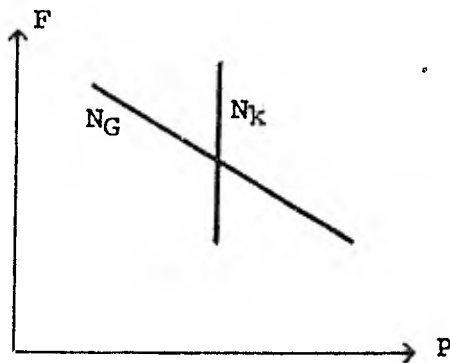
$$\Delta C = \Delta G + \Delta K$$

Si la carga hubiera sido insensible a la frecuencia -- el regulador de velocidad hubiera seguido su característica de generación hasta satisfacer la demanda, provocando con esto una disminución de frecuencia mayor.

Resumiendo podemos decir que se presentan los siguientes casos:

1. La carga no es función de la frecuencia $N_K = 0$

Este es el caso de una carga resistiva.



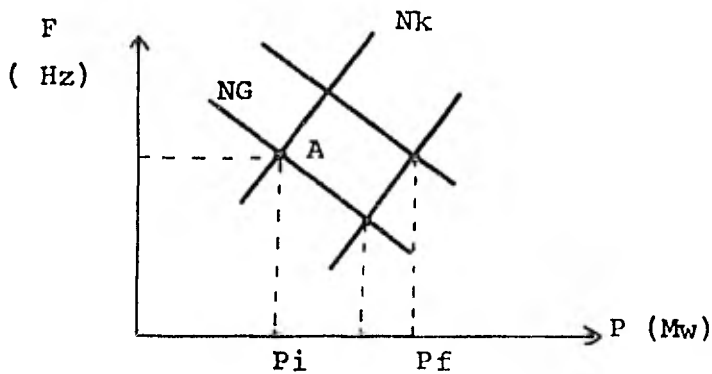
Debido a que la carga es insensible a la frecuencia, su característica se representa como una línea vertical. Al aumentar la carga el regulador de velocidad sigue la característica de generación en forma descendente hasta satisfacer la demanda. Si la carga disminuye, el regulador de velocidad sigue la característica de generación en forma ascendente, disminu-

yendo la generación hasta que esta se equilibra con la carga.

2. La carga es función de la frecuencia.

$$NK \neq 0$$

Esto sucede cuando la carga es motriz



En las condiciones iniciales la característica de la carga y de generación se encuentran en A; al ocurrir un aumento de carga, se desplazan ambas características de tal manera que su acción conjunta absorbe el aumento de carga logrando con esto que se satisfaga la demanda con una generación menor que en el caso anterior.

AMORTIGUACION (DAMPING).

El parámetro D es conocido como coeficiente de sensibilidad frecuencia carga o factor de amortiguamiento y es otra forma de representar la característica de la carga N_k , es decir, el amortiguamiento de la carga eléctrica.

$$D = \frac{\Delta P}{\Delta F} \quad \left(\frac{Mw}{Hz} \right)$$

El valor de D depende del tipo de carga de que se trate. Cuando el sistema es muy grande, el valor de D es pequeño.

Frecuentemente se utiliza el parámetro D en p.u. debido a que de esta manera se facilita su empleo.

La característica de la carga esta dada por

$$N_k = \frac{\Delta P_k}{\Delta F} \quad \left(\frac{Mw}{Hz} \right)$$

Tomamos una potencia base PB y una frecuencia base --

FB

$$D = \frac{\Delta P_k / PB}{\Delta F / FB} \quad (\text{pu})$$

$$D = N_k \frac{FB}{PB} \quad (\text{p u})$$

$$N_k = D \frac{PB}{FB} \quad (\text{p u})$$

Las unidades quedan en p.u. lo cual facilita los cálculos.

A continuación resolveremos 2 ejemplos. El primero cuando la carga es independiente del cambio de frecuencia y el segundo cuando es dependiente.

1.

| U | Pn (Mw) | Pi (Mw) | E (%) |
|---|---------|---------|-------|
| 1 | 500 | 250 | 5 |
| 2 | 800 | 400 | 5 |

El incremento de la carga es de 200 Mw, la frecuencia 60 hz y $D = 0$

Característica de la generación.

$$N1 = \frac{500}{0.05 \times 60} = 166.67 \text{ Mw/Hz}$$

$$N2 = \frac{800}{0.05 \times 60} = 266.67 \text{ Mw/Hz}$$

$$Ns = 433.34 \text{ Mw/Hz}$$

$$\Delta f = 200/433.34 = 0.4615 \text{ Hz}$$

Frecuencia Final

$$F = 60 - 0.4615 = 59.5385 \text{ Hz}$$

$$\Delta P_1 = 0.4615 \times 166.67 = 76.924 \text{ Mw}$$

$$\Delta P_2 = 0.4615 \times 266.67 = 123.07 \text{ Mw}$$

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 = 200 \text{ Mw}$$

2. Mismos datos del problemas anterior pero ahora $D = 25 \text{ Mw/Hz}$

$$N_s = 166.67 + 266.67 + 25 = 458.34 \text{ Mw/Hz}$$

disminución de frecuencia.

$$\Delta f = 200/458.34 = 0.4363 \text{ Hz}$$

$$F_f = 60 - 0.4363 = 59.5637 \text{ Hz} \quad \text{Frecuencia Final}$$

$$\Delta P_1 = 166.66 \times 0.4363 = 72.727 \text{ Mw}$$

$$\Delta P_2 = 266.67 \times 0.4363 = 116.3634 \text{ Mw}$$

$$\Delta P_k = 25 \times 0.4363 = 10.9 \text{ Mw}$$

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_k = 200 \text{ Mw}$$

El descenso de frecuencia se redujo debido a la sensibilidad de la carga.

El aumento de generación de las unidades 1 y 2 fue menor que en el caso anterior ya que 10.9 Mw se amortiguan al disminuir la frecuencia.

En seguida resolveremos un problema empleando el método de p.u.

| U | Pn (Mw) | Pi (Mw) | E (%) |
|---|---------|---------|-------|
| 1 | 300 | 200 | 5 |
| 2 | 300 | 160 | 5 |
| 3 | 600 | 420 | 5 |
| S | 1200 | 780 | - |

$$D = 3 \text{ p.u.}$$

$$P_B = 390$$

Suponemos que debido a fallas, la unidad 2 sale del sistema lo cual equivale a que la potencia que desarrollaba - esa unidad, se convierta en aumento de carga para las otras - 2 unidades.

$$N1 = \frac{300}{0.05 \times 60} = 100 \left(\frac{\text{Mw}}{\text{Hz}} \right)$$

$$N3 = \frac{600}{0.05 \times 60} = 200 \left(\frac{\text{Mw}}{\text{Hz}} \right)$$

$$N6 = 300 \frac{\text{Mw}}{\text{Hz}}$$

$$N_s = N_G + N_k$$

$$N_k = D \frac{P_B}{F_B} = 3 \frac{390}{60}$$

$$N_k = 19.5$$

$$N_s = 300 + 19.5 = 319.5 \quad \left(\frac{\text{Mw}}{\text{Hz}} \right)$$

$$\Delta F = \frac{160}{319.5} = 0.5 \text{ Hz}$$

$$f = 60 - 0.5 = 59.5 \text{ Frecuencia Final}$$

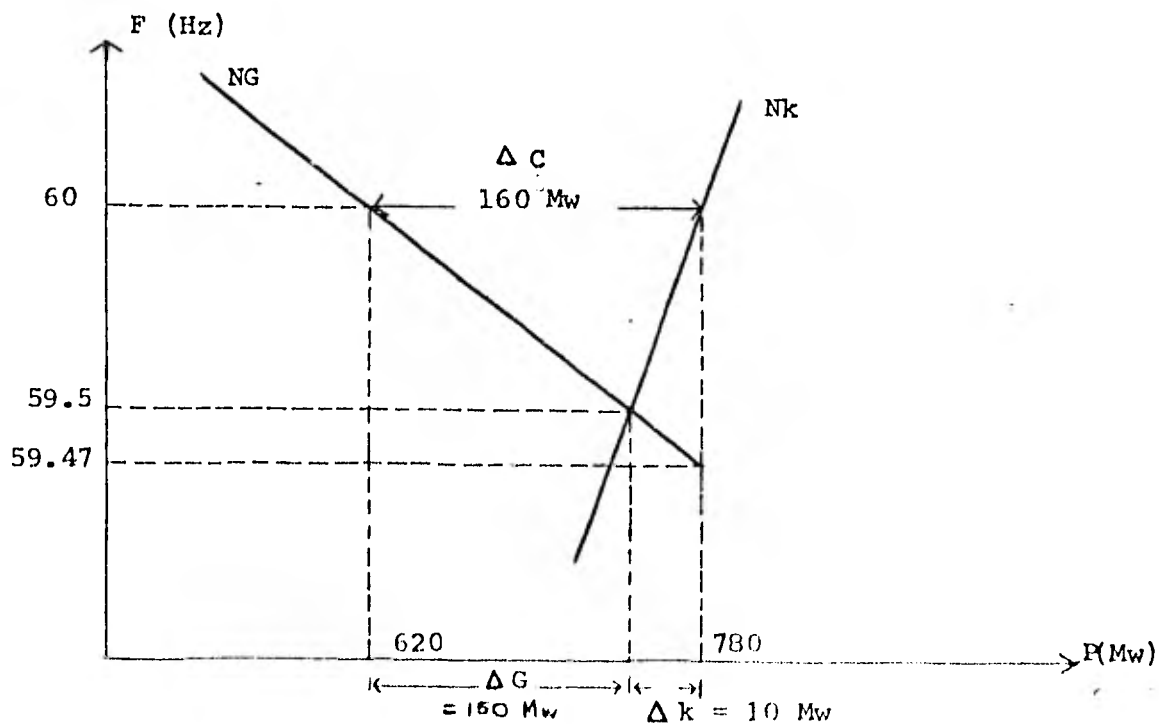
aumento de generación

$$\Delta P_1 = 0.5 \times 100 = 50$$

$$\Delta P_3 = 0.5 \times 200 = 100$$

$$\Delta P_1 + \Delta P_3 = 150 \text{ Mw}$$

10 Mw se amortiguan por la acción de la carga.



como ya habíamos dicho la proporción de la variación de la frecuencia depende del tamaño del sistema o unidad:

Mientras más grande sea este, menor será la variación y requerirá por lo tanto de un control integral de menor calidad que en el caso de tratarse de un sistema pequeño, en el cual debido a que las variaciones son mayores, requerirá un control más eficiente.

Esto lo podemos observar fácilmente a través de 2 ejemplos, un sistema grande y un sistema pequeño, en cada uno de los cuales supondremos que solo hay una máquina para hacer más explícita la diferencia.

| 1. | U | Pn (Mw) | Pi (Mw) | E (%) | |
|----|---|---------|---------|-------|-----------------------------|
| | 1 | 300 | 150 | 3 | $\Delta C = 100 \text{ Mw}$ |

$$NG = \frac{300}{0.03 \times 60} = 166.67 \quad \left(\frac{\text{Mw}}{\text{Hz}} \right)$$

$$\Delta F = \frac{100}{166.67} = 0.6 \text{ Hz}$$

$$f = 60 - 0.6 = 59.4 \text{ Hz}$$

| 2. | U | Pn (Mw) | Pi (Mw) | E (%) | |
|----|---|---------|---------|-------|-----------------------------|
| | 1 | 3,000 | 1,500 | 3 | $\Delta C = 100 \text{ Mw}$ |

$$N = \frac{300}{0.03 \times 60} = 1666.67 \quad \left(\frac{\text{Mw}}{\text{Hz}} \right)$$

$$\Delta F = \frac{100}{1666.67} = 0.06 \text{ Hz}$$

$$f = 60 - 0.06 = 59.94 \text{ Hz}$$

La variación de frecuencia en este caso es casi despreciable, por lo que el control que se usaría en este caso -- puede ser de menor calidad, tomando en cuenta el factor económico, que en el caso anterior.

III.- CARACTERISTICAS Y OPERACION DE LA MAQUINA

SINCRONA

LA MAQUINA SINCRONA

La máquina síncrona puede trabajar como motor o como generador dependiendo del uso requerido. Un motor síncrono tiene por lo tanto la misma construcción que un generador síncrono de corriente alterna, diferenciándose por el hecho de que, como motor, la máquina recibe energía eléctrica y entrega energía -- mecánica; mientras que como generador la máquina recibe energía mecánica y proporciona energía eléctrica.

Los motores síncronos tienen mucha demanda en la industria ya que su construcción es barata y para aplicaciones -- de baja velocidad, es decir, para velocidades que no sobrepasen las 500 R.P.M., son muy eficientes, pudiendo además trabajar al factor de potencia unidad.

El rotor de los motores síncronos polifásicos es de polos salientes.

Los condensadores síncronos son motores síncronos que no tienen primotor ni carga. Son instalados con el propósito -- de elevar el voltaje en los períodos en que la carga es alta -- y para disminuirlo cuando la carga es ligera, es decir, regular el voltaje, su uso más común consiste en absorber y generar energía reactiva.

Un generador síncrono operado apropiadamente puede -- ser usado para abastecer los requerimientos de vars -- de un sig

tema.

Trabajara como inductor si se encuentra sub-excitado, absorbiendo vars; y como capacitor si se encuentra sobre excitado, produciéndolos.

Por el contrario un motor síncrono sobre-excitado absorbe vars, mientras que los suministra si se encuentra sub-excitado.

La potencia real de un condensador síncrono es cero.

Los generadores síncronos trifásicos se dividen, de acuerdo a la construcción de su rotor, en máquinas de rotor cilíndrico y máquinas de polos salientes.

Los generadores síncronos impulsados por turbinas de vapor son de rotor cilíndrico, ya que para las altas velocidades desarrolladas, de 1800 y 3600 RPM., el rotor cilíndrico es capaz de resistir las fuerzas centrífugas que se presentan.

Los rotores de polos salientes son usados para bajas velocidades, como por ejemplo, la de los generadores hidráulicos. Debido a sus bajas velocidades, los generadores síncronos de polos salientes cuentan con un alto número de polos, ya que la relación entre la frecuencia y la velocidad, es

$$f = \frac{Pn\sin}{120}$$

En donde

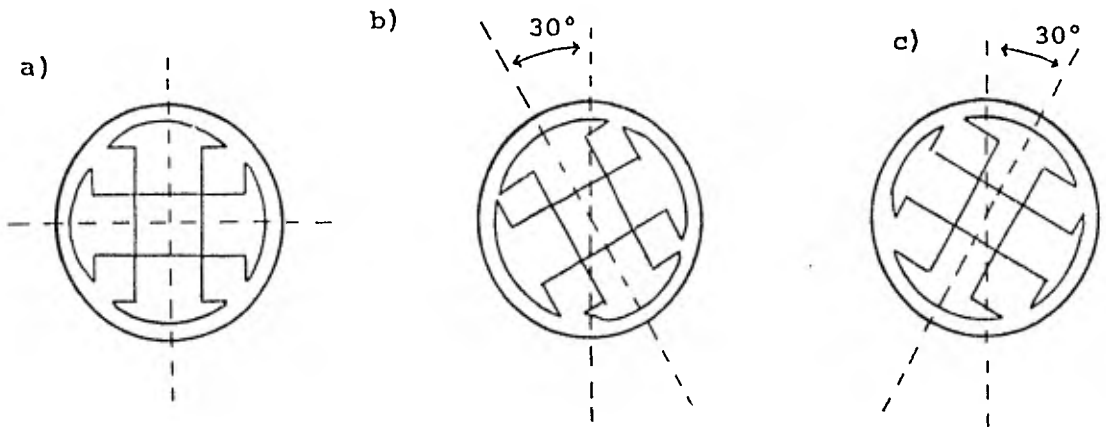
P = Número de polos

Nsin = Velocidad de sincronismo en R.P.M.

Las siguientes figuras ilustran la posición de un rotor de la máquina síncrona trabajando en 3 diferentes casos:

a) como condensador- b) como motor y c) como generador.

En estos dos últimos casos supondremos que la carga aumenta gradualmente hasta llegar a 0.5 potencia máxima.



En el caso del motor el ángulo del rotor se encuentra atrás de la posición del embobinado de armadura, mientras que en el caso del generador el rotor se encuentra adelante.

El entrehierro en máquinas de rotor cilíndrico es de longitud uniforme por lo que tiene una reluctancia magnética aproximadamente constante en cualquier posición del rotor. El entrehierro de máquinas de polos salientes es de longitud variable, por lo que la reluctancia es mayor en el espacio entre-

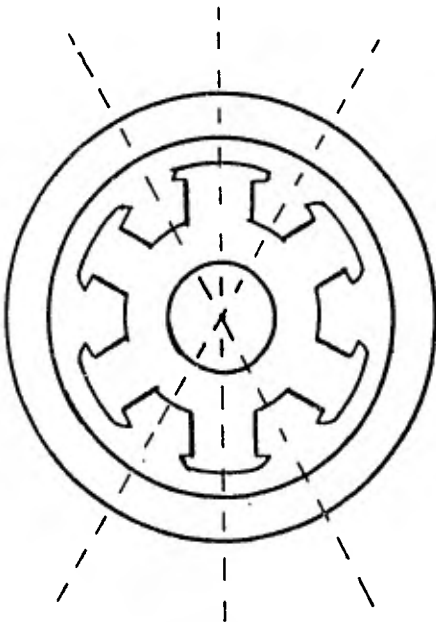
los polos y menor en los ejes del campo.

Para un rotor cilíndrico, por lo tanto la reactancia síncrona es igual tanto en el eje directo x_d como en el eje de cuadratura x_q .

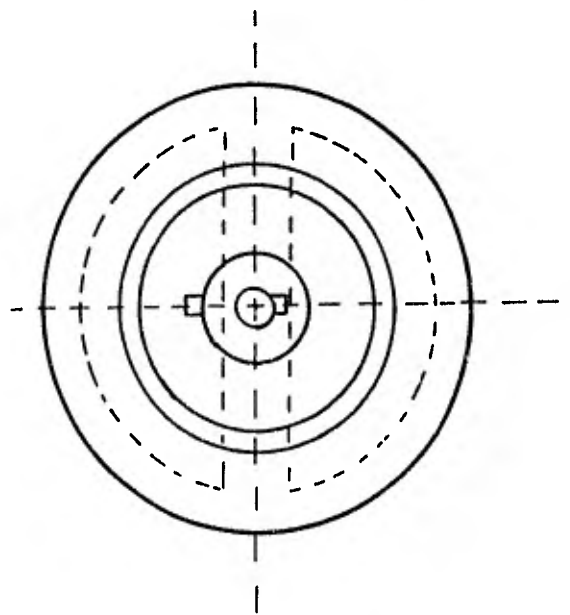
$$x_d = X_s = X_q$$

Para un rotor de polos salientes la reactancia síncrona es máxima en el eje directo x_d y mínima en el eje de cuadratura.

En el siguiente dibujo veremos la representación de una máquina síncrona para los 2 tipos de rotor.



a) Máquina Síncrona trifásica de 6 polos, rotor de polos salientes.



Máquina Síncrona de 2 polos.- Rotor cilíndrico

DIAGRAMA CIRCULAR DE UNA MAQUINA

SINCRONA

La ecuación general de una máquina síncrona, motor o -
alternador está dada por:

$$S = P + j Q \quad (\text{ VA })$$

DONDE $S =$ POTENCIA ELECTRICA APARENTE

$P =$ POTENCIA REAL O ACTIVA

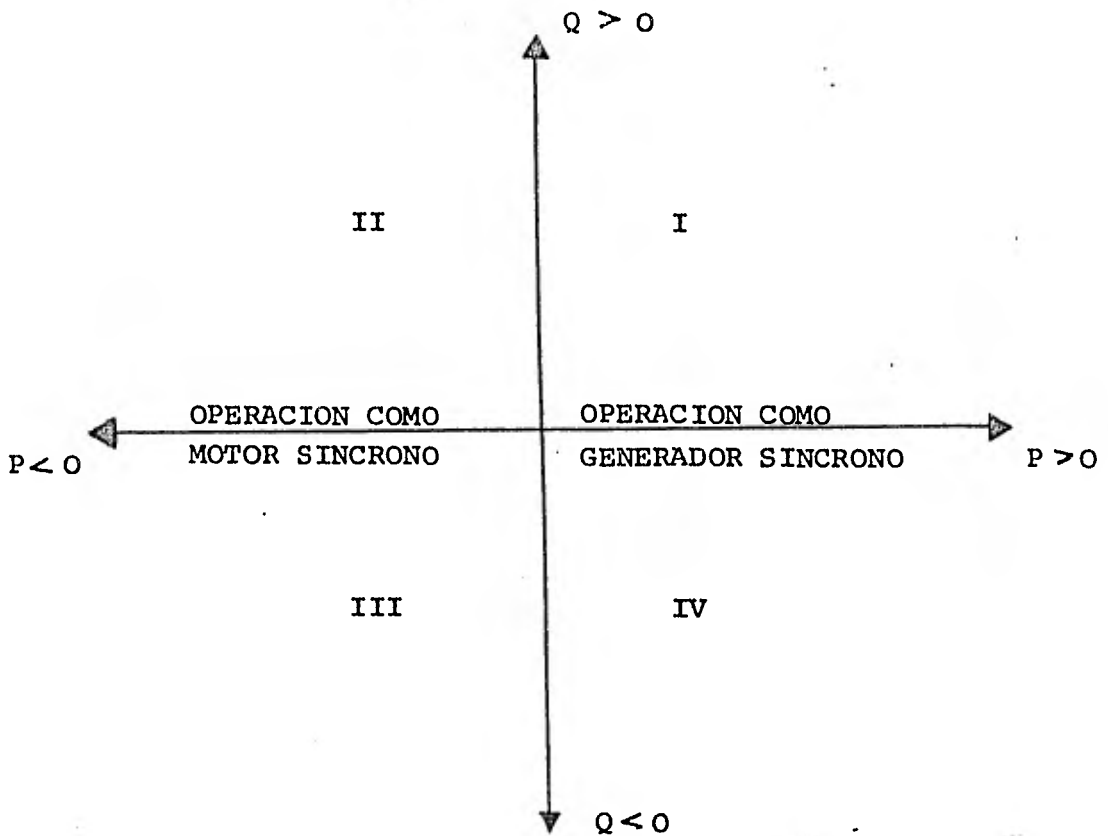
$Q =$ POTENCIA REACTIVA

ADEMAS: $S = \bar{S} \angle \theta = \bar{S} (\cos \theta + j \sin \theta)$

que corresponde a la ecuación de un círculo

$$\begin{aligned} Y \quad P &= \bar{P} e^{j0} = P & Q &= \bar{Q} e^{j\pi/2} \\ P &= \bar{P} e^{j\pi} = -P & Q &= \bar{Q} e^{j3\pi/2} \end{aligned}$$

Estas relaciones nos permiten representar sobre un --
par de ejes, P y Q el diagrama circular de la máquina síncrona,
el cual nos define la operación de la máquina síncrona depen --
diendo del cuadrante en el que se encuentre trabajando.



En el I y IV cuadrante corresponden a la operación -- como generador síncrono; el II y III a la operación como motor-síncrono; en el I y II cuadrante la máquina trabaja absorbiendo potencia reactiva, mientras que en el III y IV operará produciéndola. Si la máquina se encuentra trabajando en el eje de las ordenadas, operará entonces como condensador síncrono.

CIRCUITO EQUIVALENTE Y DIAGRAMA FASORIAL
DE GENERADORES SINCRONOS

La potencia real y reactiva proporcionada por un generador síncrono se expresa como una función del voltaje en las terminales, voltaje generado, impedancia síncrona y ángulo de potencia δ .

El voltaje generado E_f o voltaje de armadura depende del flujo por polo, el cual depende a su vez del flujo de corriente directa, conocida como corriente de campo, que circula en los arrollamientos de los polos. Esto significa que variando la excitación de corriente directa se varía el voltaje del alternador por fase. En un generador con carga, al cambiar la carga, cambiará su voltaje aún cuando la corriente de excitación se mantenga constante.

La causa de esto, es la impedancia interna del alternador. El embobinado de campo está montado en el motor en máquinas síncronas convencionales.

Para un generador síncrono de rotor cilíndrico en estado estable, el voltaje generado o voltaje de armadura se expresa :

$$E_f = E_r + (r_a + jx_d) I_a$$

donde

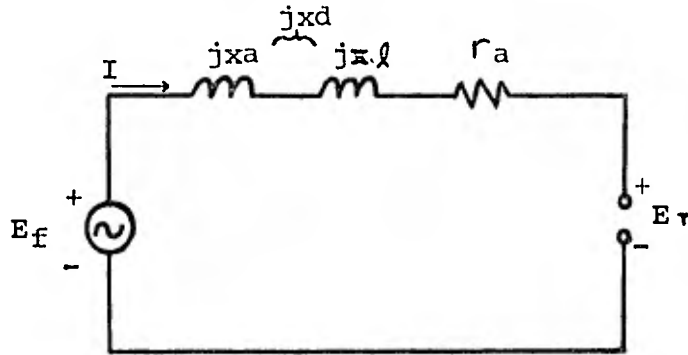
E_f = Voltaje generado por fase.

E_r = Voltaje en las terminales o inducido por fase.

$Z_d = r_d + jx_d$ = Impedancia sincrónica por fase.

I_a = Corriente nominal de armadura.

El circuito equivalente para una fase de este tipo de generador.



La impedancia sincrónica está constituida por la reactancia de dispersión x_l y la reactancia de armadura x_a

$$x_d = x_l + x_a$$

Reactancia sincrónica = Reactancia de dispersión + Reactancia de Armadura

y la resistencia de armadura r_a

$$Z_d = r_a + j(x_d + x_l)$$

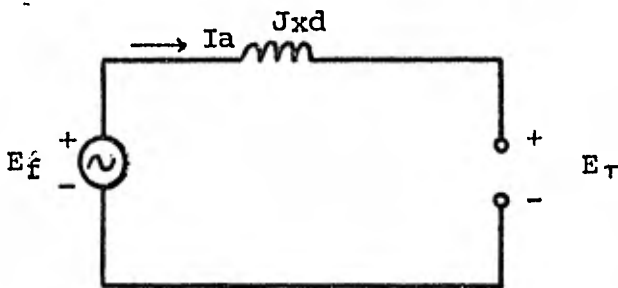
La resistencia r_a de armadura de las máquinas síncronas trifásicas es siempre menor que la reactancia sincrónica

$$r_a \ll x_d$$

$$z_d = \sqrt{r_a^2 + x_d^2} \approx x_d$$

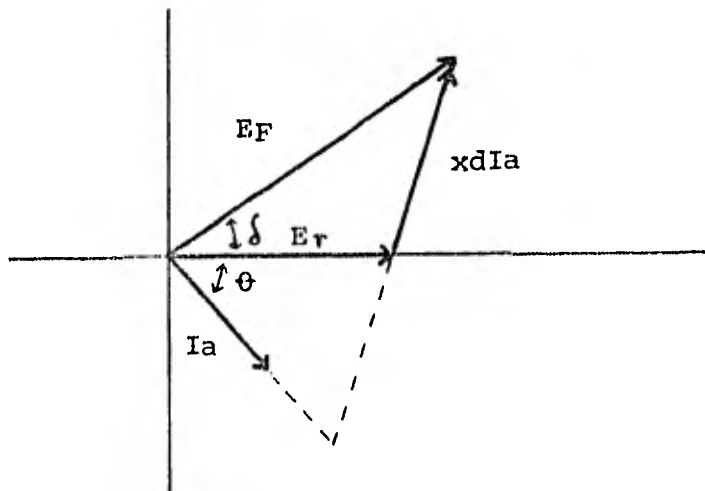
$$z_d \approx x_d$$

Por lo tanto, la resistencia de armadura r_a se desprecia y de este modo el circuito se simplifica quedando

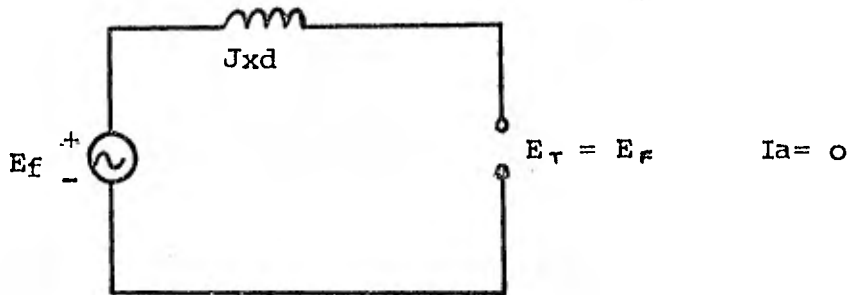


$$E_r = \bar{E}_r + (jx_d)I_a$$

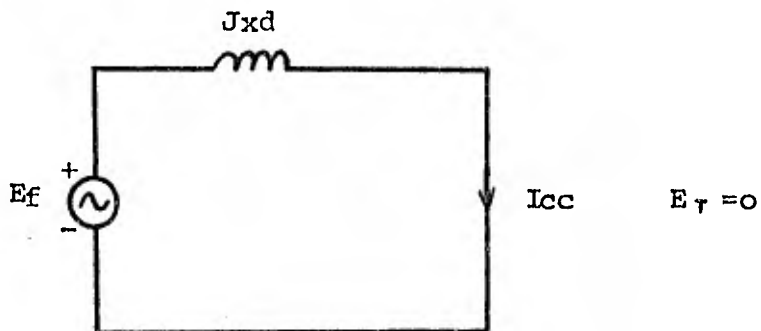
y el diagrama fasorial simplificado queda:



El valor de la reactancia síncrona se encuentra midiendo el voltaje E_T por fase sobre una fase del circuito abierto.



y posteriormente midiendo la corriente I_{cc} por fase, colocando las terminales en corto circuito



de aquí:
$$I = \frac{E_f}{x_d}$$

despejando:
$$x_d = \frac{E_f}{I}$$

De esta manera calculamos la reactancia síncrona.

Ambas pruebas se realizan a la velocidad nominal.

La reactancia síncrona no es constante sino que depende del grado de saturación de la máquina; en un alternador siempre es grande por lo que aún en condiciones de corto circuito, casi nunca se excede de 1.5 veces la corriente normal a plena carga.

ECUACION DEL GENERADOR SINCRONO

La potencia aparente monofásica de un generador síncro no con cargas equilibradas está dado por el fasor

$$\bar{S}_M = \bar{E} \hat{I} \quad (\text{VA}) \quad (1)$$

donde E e I son los valores eficaces del voltaje y la corriente -- respectivamente, en un circuito.

El uso del conjugado del fasor de la corriente permite que se tenga el signo correcto de la potencia reactiva. La -- potencia reactiva será positiva si es absorbida por una carga -- inductiva y será negativa si ésta la genera.

La potencia aparente trifásica es la suma de la potencia aparente de las 3 fases.

$$\bar{S} = 3\bar{E} \hat{I} \quad (\text{VA}) \quad (2)$$

Si definimos bases para poner esta potencia en por unidad

$$S_{BM} = E_B I_B \quad (\text{VA})$$

$$S_{BT} = 3E_B I_B \quad (\text{VA})$$

Dividiendo las potencias 1 y 2 por sus potencias bases:

$$\frac{\bar{S}_M}{S_{MB}} = \frac{\bar{E} \hat{I}}{E_B I_B} \quad S_M = \hat{E} \hat{I} \quad (\text{pu})$$

$$\frac{\bar{S}}{S} = \frac{3\bar{E} \bar{I}}{3E I} \quad S_T = \hat{E} \hat{I} \quad (\text{pu})$$

De lo anterior se deduce que la potencia aparente monofásica -- es igual a la potencia aparente trifásica cuando se trata de -- valores en por unidad.

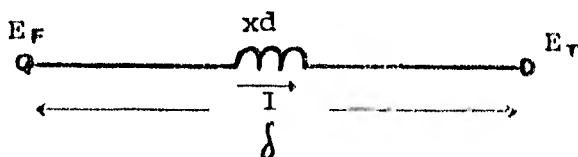
$$S_T = S_M$$

$$S = \hat{E} \hat{I} \quad (\text{pu}) \quad (3)$$

Habíamos visto anteriormente que para un generador síncrono de rotor cilíndrico el voltaje generado es

$$E_F = E_T + jx_d I_a \quad (\text{pu}) \quad (4)$$

ya que hemos considerado al generador como una reactancia.



Despejando en 4

$$(jxd)I = E_F - E_T$$

$$I = \frac{E_F - E_T}{jxd}$$

Su conjugado es

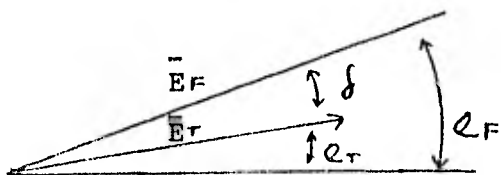
$$\hat{I} = \frac{\hat{E}_F - \hat{E}_T}{-jxd}$$

Sustituyendo en (3)

$$S = E_T \frac{\hat{E}_F - \hat{E}_T}{-jxd}$$

$$S = \frac{E_T \hat{E}_F - E_T^2}{-jxd} = \frac{E_T^2}{jxd} - \frac{\hat{E}_F E_T}{jxd}$$

$$S = \frac{\bar{E}_T^2}{xd} e^{-j\pi/2} + \frac{E_F e^{-j\theta} E_T e^{j\pi/2}}{xd}$$



dónde δ = ángulo de potencia que desarrolla la unidad.

Finalmente:

$$S = \frac{\bar{E}_r^2}{xd} e^{-j\pi/2} + \frac{\bar{E}_F \bar{E}_r}{xd} e^{j(\pi/2 - \delta)} \quad (\text{pu})$$

Esta ecuación nos representa la potencia terminal para un generador síncrono de rotor cilíndrico.

Aplicando la igualdad trigonométrica

$$\cos \frac{\pi}{2} \cdot \cos \delta + \sin \frac{\pi}{2} \cdot \sin \delta = \cos \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right)$$

En la expresión de la potencia terminal la ecuación de la potencia real queda

$$P = \frac{\bar{E}_r \bar{E}_F}{xd} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right) \quad (\text{pu})$$

Aplicando la igualdad $\cos \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right) = \sin \delta$

la potencia activa queda finalmente

$$P = \frac{\bar{E}_r \bar{E}_F}{xd} \sin \delta \quad (\text{pu})$$

La potencia reactiva se encuentra aplicando la relación:

$$\begin{aligned} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right) &= \sin \frac{\pi}{2} \cdot \cos \delta - \cos \frac{\pi}{2} \cdot \sin \delta \\ Q &= \frac{\bar{E}_F \bar{E}_r}{xd} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right) - j \frac{\bar{E}_r^2}{xd} \end{aligned}$$

Y sustituyendo la igualdad $\sin \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right) = \cos \delta$:

$$Q = \frac{\bar{E}_F \bar{E}_r}{xd} \cos \delta - \frac{\bar{E}_r^2}{xd} \quad (\text{pu})$$

y sustituyendo la igualdad $\cos(\pi/2 - \delta) = \sin \delta$:

$$Q = \frac{\bar{E}_F \bar{E}_T}{x_d} \cos \delta - \frac{\bar{E}_T^2}{x_d} \quad (\text{pu})$$

La curva de potencia activa de un generador síncrono de rotor -- cilíndrico se representa gráficamente como una función del ángulo de potencia o ángulo de fase entre E_T E_F .

Mediante la ecuación

$$P = \frac{E_F E_T}{x_d} \sin \delta$$

Observamos que si $E_T = E_F$ el ángulo δ aumenta paralela -- mente a la carga. Si el ángulo de potencia δ aumenta gradualmente, la salida de potencia real aumenta hasta alcanzar un --- máximo en en $\frac{\pi}{2}$ (90°)

$$\text{Para } \delta = 90^\circ \Rightarrow \sin \delta = 1$$

La potencia máxima estará dada por

$$P = \frac{E_T E_F}{x_d} \quad (1) = \frac{E_T E_F \text{ MAX}}{x_d}$$

Este es el límite de estabilidad del generador síncrono.

Cualquier aumento en la potencia mecánica al generador síncro -- no después de que δ ha alcanzado 90° , producirá una disminu-

En las máquinas de polos salientes el ángulo de fase al cual -- el generador se sale de sincronismo es de menos de 90° debido - a que los polos del generador crean un par de reluctancia.

Para variar el flujo de potencial real, se adelanta o atrasa el ángulo de fase δ , es decir, una vez que el voltaje generado y el voltaje inducido son iguales, se desfazan. Esto se logra - variando, incrementando o reduciendo el flujo de energía, vapor o gas, que recibe la turbina. Si la energía se incrementa, la - velocidad de la turbina asciende y el ángulo δ se incremen - ta, incrementándose también la salida de potencia. Si la ener - gía se reduce, se producirá el efecto inverso.

La potencia reactiva se cambia variando la magnitud del volta - je generado con respecto al voltaje inducido, lo cual se logra - variando la excitación de campo del generador síncrono. Al ser - el voltaje generado mayor que el inducido, habrá flujo de po -- tencia reactiva. Al aumentarse la excitación de cd se logra --- que aumenten los reactivos. Los vars se caracterizan por el he - cho de que fluyen siempre de los puntos del alto a bajo volta - je.

CAPABILIDAD DE LA ARMADURA

La capacidad de la armadura se refiere a los valores límites - de operación, a valores nominales de voltaje y corriente de

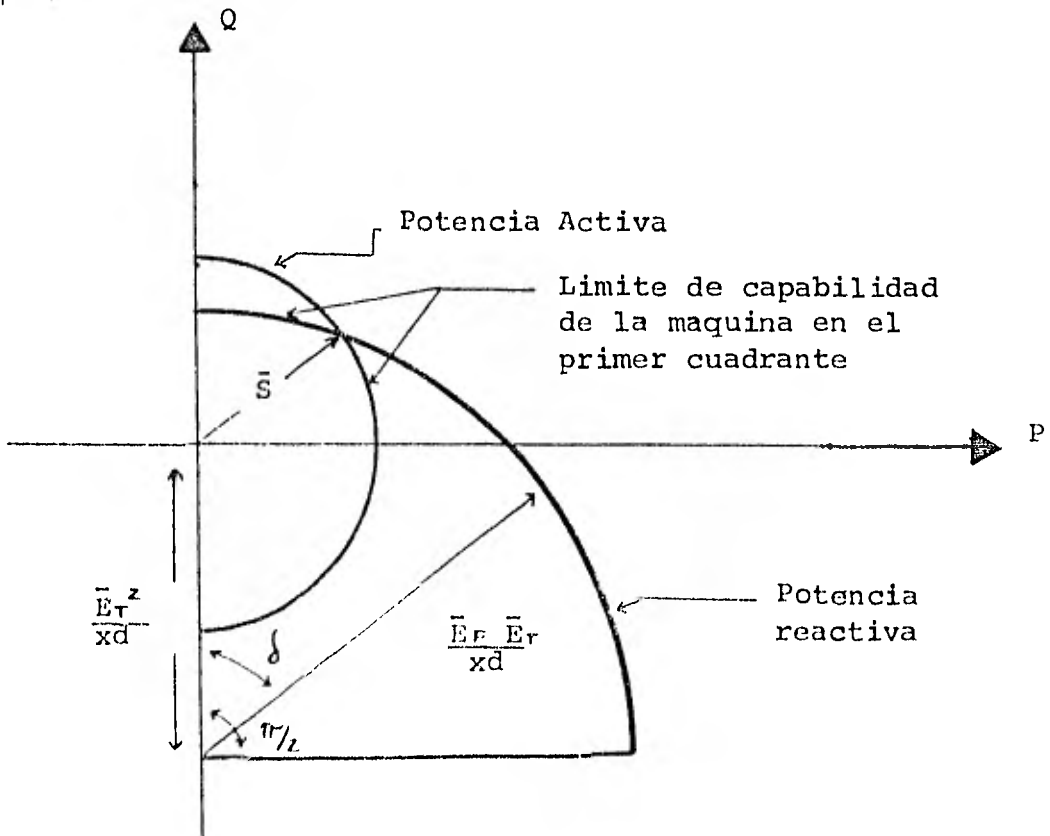
una máquina síncrona.

En el caso del generador, para encontrar dichos límites nos basaremos en la ecuación de un generador síncrono

$$S = \frac{\bar{E}_T \bar{E}_F}{x_d} e^{j(\frac{\pi}{2} - \delta)} - j \frac{\bar{E}_T^2}{x_d}$$

La cual nos representa un círculo.

El voltaje E_F y la potencia terminal S nos determinan 2-circunferencias cuya intersección nos limita la zona de operación de un generador síncrono



Los límites de operación, también llamados límites térmicos no deberán ser excedidos, pues excitando la máquina más allá de - estos límites, ocasionaría el desgaste prematuro de ésta.

El diagrama de capacidad nos muestra la interacción entre la potencia activa y la potencia reactiva que genera la máquina.

CARACTERISTICAS Y OPERACION DEL REGULADOR

DE VELOCIDAD.

REGULADOR DE VELOCIDAD

INTRODUCCION

Debido a que en la adaptación de la generación a la carga existe una diferencia entre la potencia generada y la potencia consumida, habrá una desviación de la frecuencia eléctrica nominal que puede sobrepasar el rango de tolerancia permisible. Para solucionar esta situación se utiliza un sistema automático de regulación. Las unidades generadoras están provistas de regulador de velocidad, el cual está formado por un conjunto de elementos que se encarga de variar la potencia generada. Existen 2 tipos de reguladores: taquimétricos y acelerométricos:

El taquimétrico se da en términos de velocidad:

$$\left[\begin{array}{c} w_t \\ w_E \end{array} \right] = \frac{1}{p} \alpha \int_0^t \rightarrow w_t = \alpha t + w_E \quad \begin{array}{l} t: \text{ tiempo } t \\ w_E: \text{ Westable} \end{array}$$

El acelerométrico se da en términos de aceleración:

$$w = p\alpha$$

$$\left[\begin{array}{c} \theta_t \\ \theta_i \end{array} \right] = \frac{1}{p} w \int_0^t = \frac{1}{p} [\alpha t + w_E] \int_0^t \longrightarrow$$

$$\theta_t = \frac{1}{2} \alpha t^2 + \omega_E t + \theta_i$$

La función del regulador de velocidad es sensar la magnitud de la velocidad de la turbina y responder con una salida proporcional que se usa para propósitos de control.

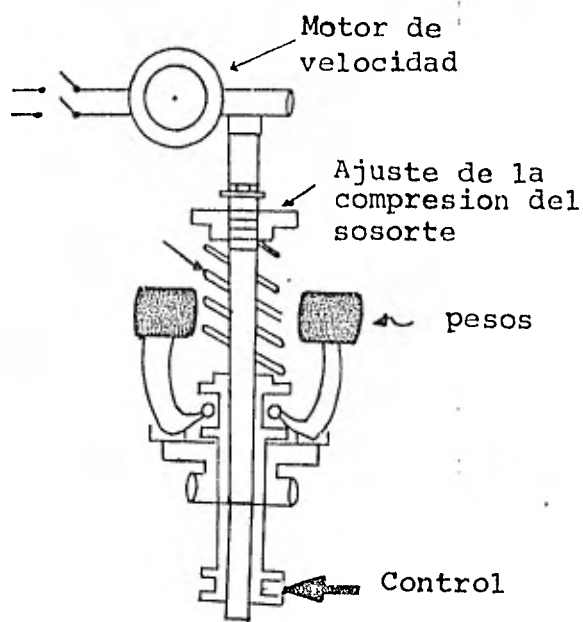
El regulador actúa sobre la admisión de la turbina cuando la velocidad de ésta se aleja del valor de la velocidad del regulador, usado como referencia. La potencia de salida de la turbina está controlada por la variación del flujo de vapor a través de la válvula de paso; las válvulas están controladas por el regulador de velocidad.

REGULADORES DE VELOCIDAD

Existen 3 tipos generales de reguladores de velocidad

- a) Mecánicos
- b) Eléctricos
- c) Hidráulicos

El regulador de velocidad mecánico es un sistema balanceado de fuerzas. La fuerza centrífuga de los pesos rotatorios está balanceada por la fuerza elástica de un resorte y por la posición radial elevada por los pesos, es dependiente de la velocidad de rotación.



Este tipo de regulador es de uso común en una planta de turbina moderna. Para asegurar una respuesta rápida a cambios en la velocidad, las fuerzas de fricción deben ser pequeñas; el regulador deberá ser amortiguado para asegurar que la respuesta de este sea oscilatoria. Un buen regulador debe ser diseñado con pequeños pesos para que de esta manera pueda ser compensada la pérdida de la fuerza saliente. El resorte del regulador deberá ser lubricado para reducir la fricción.

El regulador eléctrico se ha desarrollado recientemente. Un tipo común de regulador de velocidad eléctrico, es de la forma de un generador de magneto permanente, que produce una onda de corriente alterna de frecuencia directamente proporcional a la velocidad del eje.

Esta onda se envía a un filtro eléctrico que produce una resonancia a una frecuencia correspondiente a la velocidad fijada y la onda es rectificad para producir una señal de corriente directa proporcional a la diferencia entre la velocidad actual

y la fijada. La señal de error de velocidad de corriente directa se amplifica para producir la señal de corrección de velocidad.

Otro tipo de reguladores de velocidad eléctricos utiliza las señales digitales de un generador de onda cuadrada; la salida es comparada con una señal de onda cuadrada de referencia, -- generada por un oscilador. La salida del comparador es rectific-- cada y amplificada para formar la señal de control.

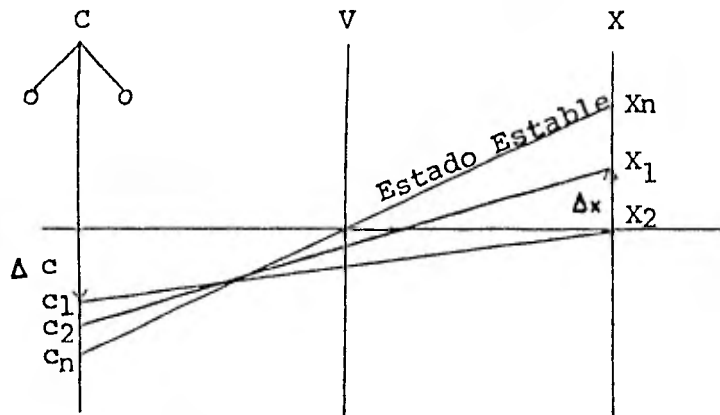
El regulador de velocidad eléctrico tiene la ventaja -- de la alta velocidad y exactitud con que maneja la señal de ve -- locidad; tiene además mejor estabilidad que un regulador mecáni -- co.

El regulador de velocidad hidráulico consiste de una -- bomba centrífuga accionada desde un eje principal, el cual sumi -- nistra aceite a un cilindro conteniendo un pistón. La presión es proporcional al cuadrado de la velocidad, así que la posición -- del pistón es una función de la velocidad.

El sistema esta en equilibrio de velocidad cuando el -- par de marcha de la turbina T_t es igual al par resistente del generador T_e ; esto último es dependiente de la demanda eléctri -- ca de los consumidores. Al aumentar o disminuir la velocidad de la máquina, el regulador de velocidad o responderá a través del -- sistema de control, cerrando o abriendo las válvulas de vapor --

hasta que el par de la turbina sea igual al de la nueva demanda de potencia.

El siguiente dibujo nos muestra el esquema de un regulador de velocidad hidromecánico



V: Vástago de la válvula piloto

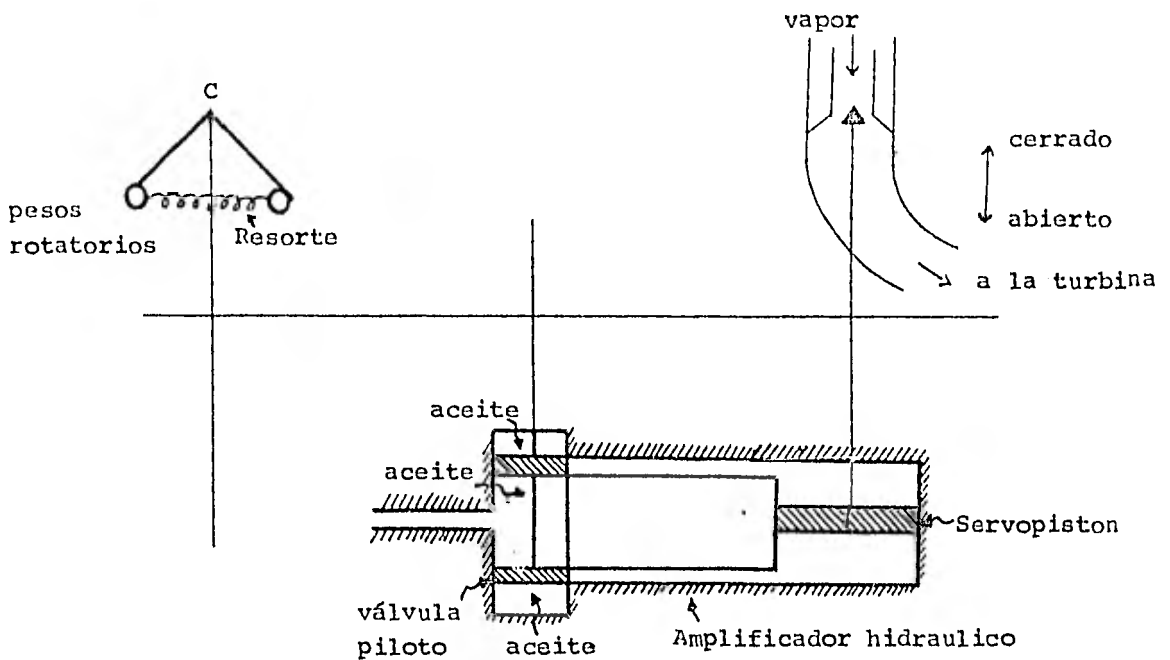
X: Vástago del servomecanismo

$$\frac{\Delta c}{\Delta F} = CTE$$

ΔF produce cambio de posición del vástago C

Al disminuir la frecuencia, las bolas se cierran y baja por consiguiente el punto C un Δc , permitiendo que se abra la válvula de paso.

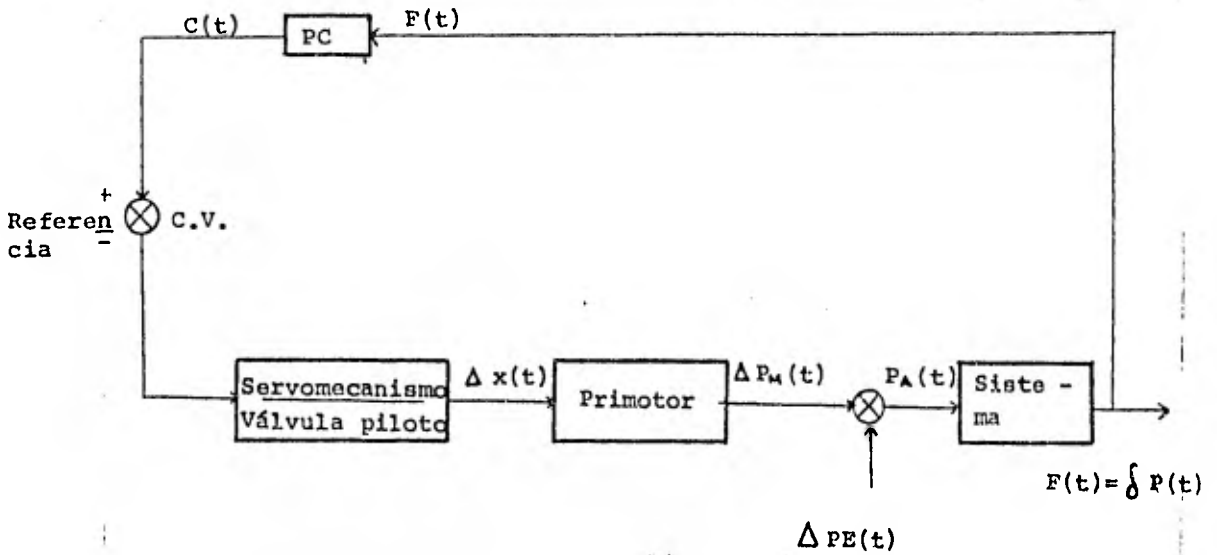
En el sig. dibujo veremos en forma esquemática como actúa el piston en un regulador hidromecánico



Cuando la válvula piloto baja, el aceite entra y empuja el émbolo o servo piston.

REPRESENTACION MATEMATICA DE LOS ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN EL CONTROL DE LA VELOCIDAD O FRECUENCIA DE UN SISTEMA DE ENERGIA.

El siguiente diagrama de bloques nos representa en forma simplificada a los diferentes elementos que efectuan la corrección de potencia generada para un cambio de carga dado.



donde:

PC: Péndulo centrífugo

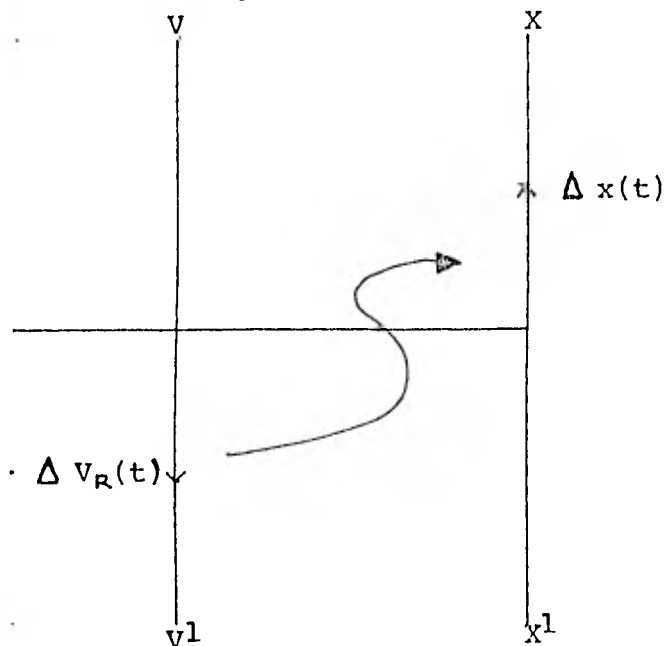
PA: Potencia de aceleración

PM: Potencia mecánica

PE: Potencia eléctrica

C.V: Cambiador de velocidad

Modelo Matemático del Regulador de Velocidad, en Estado Estable.



Al ocurrir un aumento de carga en el sistema, la frecuencia disminuye y la válvula piloto baja en una pequeña cantidad Δv_R obligando al servomecanismo a subir una pequeña distancia proporcional a Δv_R provocando con esto el aumento de vapor al primotor

$$d [\Delta x(t)] = K_2 \Delta v_R (t) dt$$

Es decir, el movimiento Δx es una integral de Δv_R

$$\Delta x(t) = \int K_2 \Delta v_R(t) dt = \frac{1}{p} K_2 \Delta v_R (t) dt$$

$$\Delta x(t) = \frac{1}{p} K_2 \Delta v_R (t) \quad (\text{pu})$$

donde $\frac{1}{p} = \text{integral}$

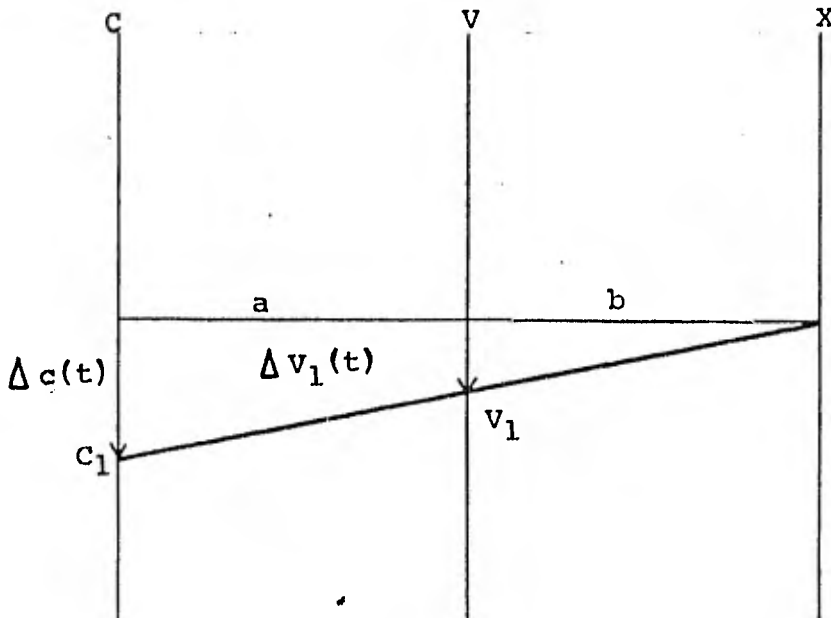
Esta ecuación liga el movimiento de la válvula piloto con el servomecanismo, el cual es un integrador del movimiento de la válvula piloto.

La relación que nos describe este movimiento es por lo tanto:

$$\frac{\Delta x(t)}{\Delta v_R(t)} = \frac{1}{p} K_2$$

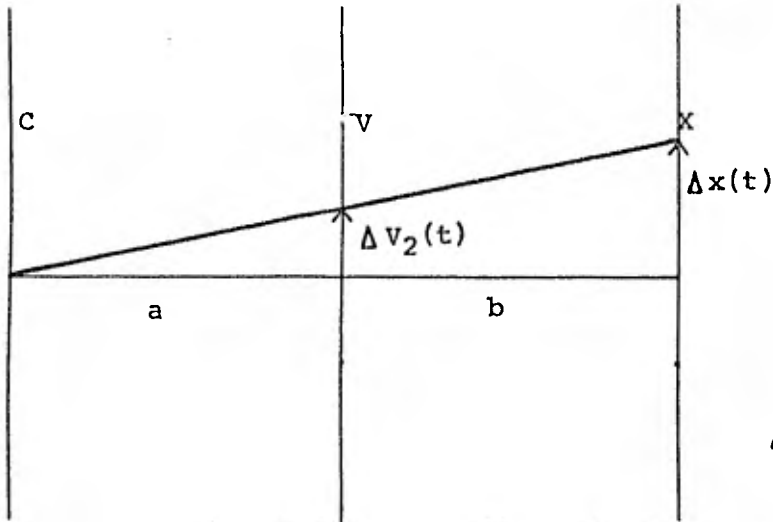
donde K_2 depende del orificio y geometría del cilindro y la presión del fluido en el amplificador hidráulico.

Ahora obtendremos las otras constantes que intervienen entre los movimientos.



$$\frac{\Delta v_1(t)}{\Delta c(t)} = \frac{b}{a+b} = K_1$$

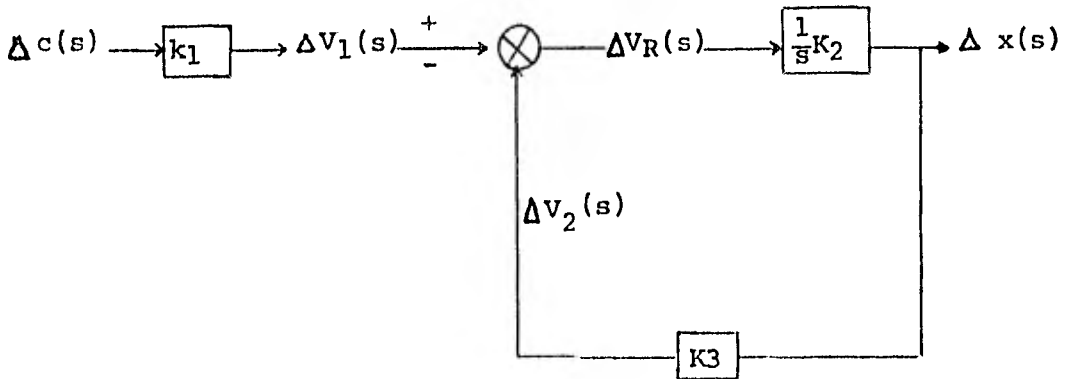
ahora suponemos que el émbolo se mueve sin cambio de frecuencia



$$\frac{\Delta v_2(t)}{\Delta x(t)} = \frac{a}{a+b} = K_3$$

Las constantes K_1 y K_3 dependen de la longitud de las articulaciones a y b

Ahora procederemos a obtener la función de transferencia del regulador de velocidad



donde Δv_R es la diferencia entre Δv_2 y Δv_1 , dicho en otras palabras, es el error entre Δc y Δx . Si $\Delta v_R \neq 0$ indicara que aún no hay equilibrio entre la generación y la --

carga.

del diagrama:

$$\Delta x(s) = \frac{1}{s} K_2 \Delta v_R(s) = \frac{1}{s} K_2 [\Delta v_1(s) - \Delta v_2(s)]$$

$$\Delta x(s) = \frac{1}{s} K_2 [K_1 \Delta c(s) - K_3 \Delta x(s)]$$

$$\Delta x(s) = \frac{1}{s} K_1 K_2 \Delta c(s) - \frac{1}{s} K_2 K_3 \Delta x(s)$$

agrupando:

$$\Delta x(s) [(s + K_2 K_3)] = K_1 K_2 \Delta c(s)$$

$$\text{F.T.} = \frac{x(s)}{\Delta c(s)} = \frac{K_1 K_2}{s + K_2 K_3}$$

$$\text{F.T.} = K_1 \frac{1}{\frac{s}{k_2} + k_3} = \frac{K_1}{K_3} \frac{1}{s \frac{1}{K_2 K_3} + 1}$$

Finalmente

$$\text{F.T.} = \frac{K_1}{K_3} \frac{1}{s \tau_R + 1} \quad \text{Función de transferencia del regulador}$$

donde $\tau_R = \frac{1}{K_2 K_3}$ constante de tiempo del regulador

Y es una medida de la velocidad de reacción del mecanismo.

$$\text{Ademas } \frac{k_1}{k_3} = N_G = E^{-1} = R^{-1}$$

Regulación de velocidad debida a la acción del regulador.

dor.

MODELO MATEMATICO DE LA TURBINA

El movimiento del servomecanismo Δx provoca cambio en la potencia del primotor o turbina ΔP_T y esto a su vez produce un cambio en la potencia del generador ΔP_G .

El modelo de representación de un generador de turbina sin recalentamiento es:

$$F_T = \frac{\Delta P_G(s)}{\Delta X(s)} = \frac{1}{1 + s \tau}$$

donde τ es una constante de tiempo

MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA

Sabemos que el par de aceleración es

$$T_a = J \alpha (\text{kgm rd}^{-1})$$

donde J = Momento de inercia del sistema

α = Aceleración angular

además el par de aceleración, usando ángulo eléctrico es igual a

$$T_a = J p^2 \Theta = J p^2 \delta \quad (\text{p.u.})$$

además como trabajaremos las variables en por unidad:

$$T_a = P_a \quad (\text{p.u.})$$

$$\text{y sabemos que } P_a = M p^2 \delta \quad (\text{p.u.})$$

M = inercia efectiva del sistema

entonces podemos escribir

$$T_a = M p^2 \delta \quad (\text{pu})$$

$$T_a(s) = M_s p \delta(s) \quad (\text{pu})$$

$$\frac{P \delta(s)}{T_a(s)} = \frac{1}{M_s} \quad \text{Función de transferencia.}$$

$$\text{como } T_a(s) = \Delta P_M(s) - \Delta P_E(s) \quad (1)$$

$$\text{Entonces } \frac{P \delta(s)}{\Delta P_M(s) - \Delta P_E(s)} = \frac{1}{M_s}$$

ahora tomando en cuenta el amortiguamiento de la carga, es decir si la carga es sensible a la frecuencia

$$\Delta P_E = \Delta P_G + \Delta P_K = \Delta P_G + N_K \Delta F \quad (2)$$

$$\text{ya que } N_K = \frac{\Delta P_K}{\Delta F} \quad \Delta P_K = N_K \Delta F$$

$$\text{donde } N_K = D \frac{P_B}{F_B} \quad (\text{pu})$$

D = coeficiente de sensibilidad frecuencia carga o factor de amortiguamiento.

$$\text{Si } P_B \text{ y } F_B = 1$$

$$\text{Entonces } N_K = D, \quad \text{sust. en (2)}$$

$$\Delta P_E(t) = \Delta P_G(t) + D \Delta F(t)$$

$$\text{como } F = p \delta(t)$$

$$\Delta P_E(s) = \Delta P_G(s) + D p \delta(s) \quad (\text{pu})$$

sustituyendo en (1)

$$T_a(s) = \Delta P_M(s) - \Delta P_E(s) = M_s p \delta(s)$$

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

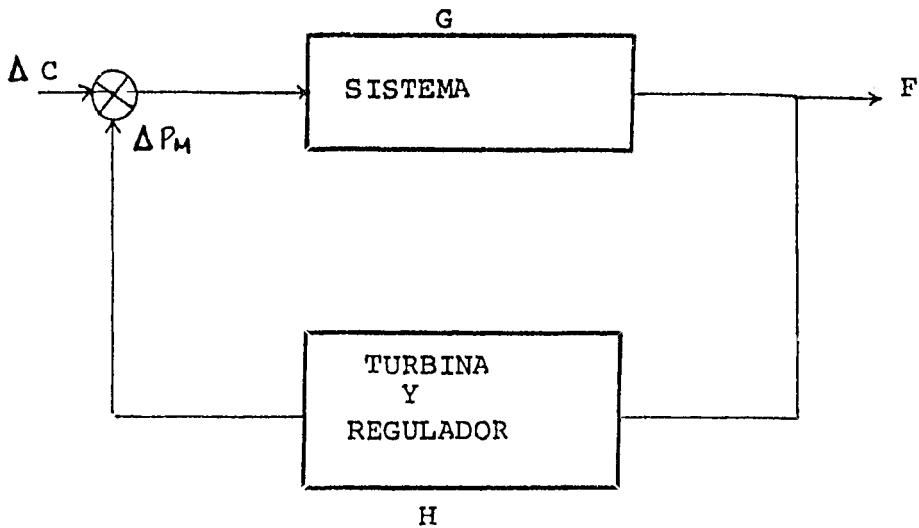
agrupando

$$\Delta P_M(s) - \Delta P_G(s) - (M_s \pm D) p \delta(s) \quad (\text{pu})$$

$$\Delta P_M(s) - \Delta P_G(s) = (M_s + D) p \delta(s) \quad (\text{pu})$$

$$\text{F.T.} = \frac{p \delta(s)}{\Delta P_M(s) - \Delta P_G(s)} = \frac{1}{M_s + D} \quad \text{Funcion de transferencia}$$

Organizando ahora las funciones de transferencia con que contamos con el propósito de poner nuestro sistema de control en forma canonica.



Para simplificar la forma canonica no se tomo en cuenta el cambiador de velocidad, evitando con esto el tener otro comparador

$$\frac{\Delta F}{\Delta C} = \frac{G}{1 + GH} \quad \text{Forma Canónica}$$

Las funciones de transferencia son:

$$G: \frac{1}{Ms + D}$$

$$H: \frac{1}{1 + s \tau_R} \quad \frac{1}{1 + s \tau_T} \quad \frac{1}{Ms + D}$$

Para evitar tener una ecuación de tercer orden y dado que τ_R es menor de 100 mseg, se considera que $\tau_R \doteq 0$ con lo cual nuestro sistema es ahora de segundo orden

$$\frac{\Delta F}{\Delta C} = \frac{\frac{1}{Ms} + D}{1 + \left(\frac{1}{Ms + D} \right) \left(\frac{1}{1 + s \tau_T} \right)}$$

2.1 EL REGULADOR DE WATT.

La figura 2.1 representa la relación estado estable -- entre el primotor y una carga conectada. Este puede ser un sistema electro-mecánico, un sistema eléctrico o un sistema mecánico únicamente. El principio es el mismo. El sistema está en equilibrio y es estable.

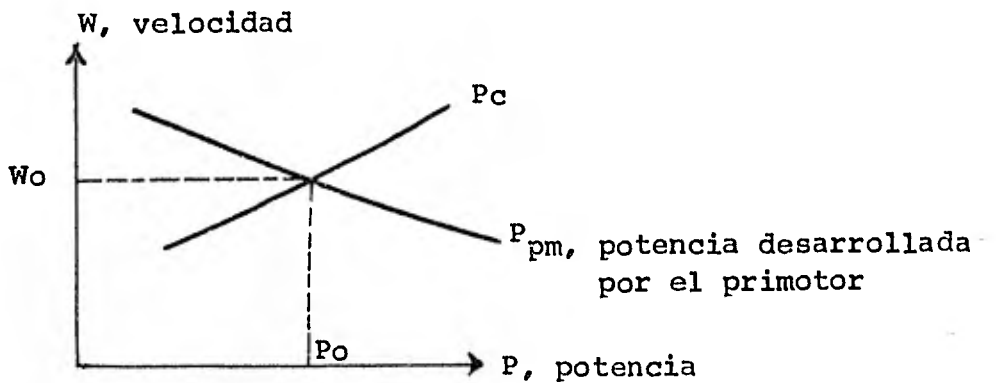


Fig. 2-1

Una apreciación de la estabilidad puede ser obtenida considerando que algo provoca que aumente la velocidad una cantidad infinitesimal. La potencia tomada por la carga, P , es mayor que la potencia desarrollada por el primotor. Entonces la velocidad del sistema disminuirá, tendiendo a regresar a W_0 . Si la velocidad disminuye, la relación opuesta de potencia prevalece y la velocidad tiende a crecer y regresar a W_0 . Este argumento es válido para cualquier sistema en el cual

$$dP_c / dP > dP_{pm} / dP \quad (2-1).$$

(2-1) Puede ser usada como una especificación de estabilidad -- para un sistema.

Ahora supongamos que la carga cambia (incrementa) como se muestra en la figura 2.2

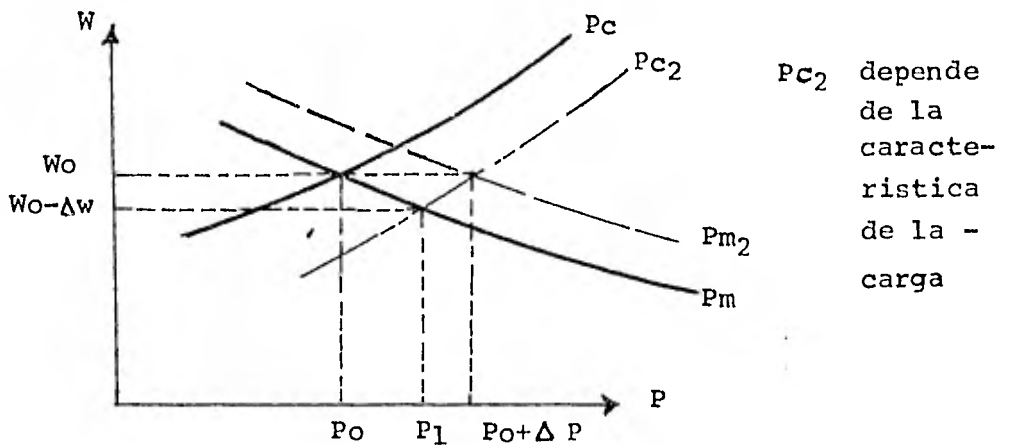


Fig. 2.2

Las características iniciales se muestran con línea completa y los valores iniciales son w_0 y P_0 . La característica de la carga variable se muestra con línea incompleta y es P_{c2} . Si la característica del primotor no cambia, el nuevo estado estable de la carga y de la velocidad será P_c y $w_0 - \Delta w$. Si la característica del primotor cambia, esta se representa -- por P_{pm2} , la nueva velocidad de estado estable será otra vez w_0 y la nueva carga será $P_0 + \Delta P$ (nosotros podemos causar cualquier otra velocidad deseada haciendo el cambio apropiado en la característica del primotor). El dispositivo usado para cambiar

o modificar la característica del primotor es llamado regulador. Este regulador está compuesto de varios elementos los cuales -- forman un sistema que sensa los cambios de velocidad y actúan -- para cambiar la energía por unidad de tiempo al primotor, la fi gura 2.3 representa un regulador de tipo simple, conocido como -- regulador de Watt. Consiste de una cabeza de bola mecánica la -- cual sensa los cambios de velocidad y actúa a través de una co -- nexión para modificar el ajuste de "paso".

El ajuste de paso determina el flujo de energía al -- primotor.

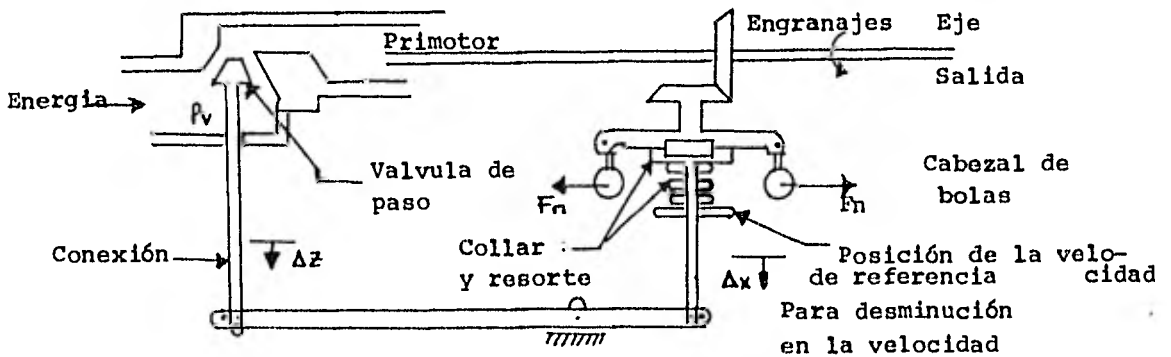


fig. 2.3

Gobernador de Watt, Simplificado

En este regulador, como w decrece una cantidad Δw , una Δz resultante causa que la válvula de paso abra, admitiendo más energía al primotor lo cual cambia la característi--

ca velocidad-potencia del primotor.

En el análisis de varios reguladores y configuraciones de sistemas, nosotros despreciaremos las variaciones momentáneas dentro del regulador, por ejemplo la cabeza de bola y el resorte forman un sistema de segundo orden y cualquier cambio en la posición de la cabeza de bola resultará en oscilaciones en las bo -- las.

La caída o pendiente del sistema regulador está dada -- por la figura 2.4

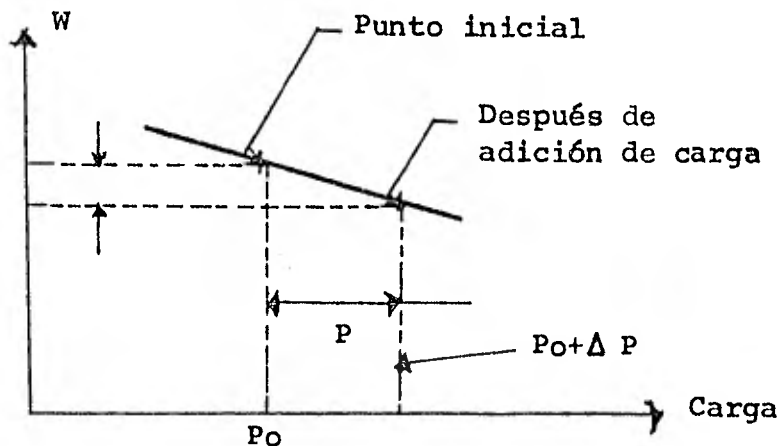


Fig. 2.4

La pendiente es deseable para primotores que manejan -- alternadores en paralelo. La pendiente existe en este regula -- dor. La habilidad para cambiar la velocidad fijada es también -- esencial si la velocidad constante de estado estable debe ser -- mantenida con cambio de carga.

2.2 EL REGULADOR CON AMPLIFICADOR HIDRAULICO

Dado que hasta ahora no hay otra amplificación que la obtenida a través de la conexión, las bolas deben ser pesadas - si es que son operadas en primotores grandes. Al incrementarse el tamaño el regulador tiende a hacerse menos sensitivo. La insensibilidad relativa y la fricción resultan en una pérdida de enlace en adición al problema del tamaño. Entonces es deseable utilizar un arreglo de amplificación de potencia como se muestra en la figura 2.5, consistente de una válvula y un servo posicionador, el cual utiliza energía hidráulica para actuar la conexión de paso.

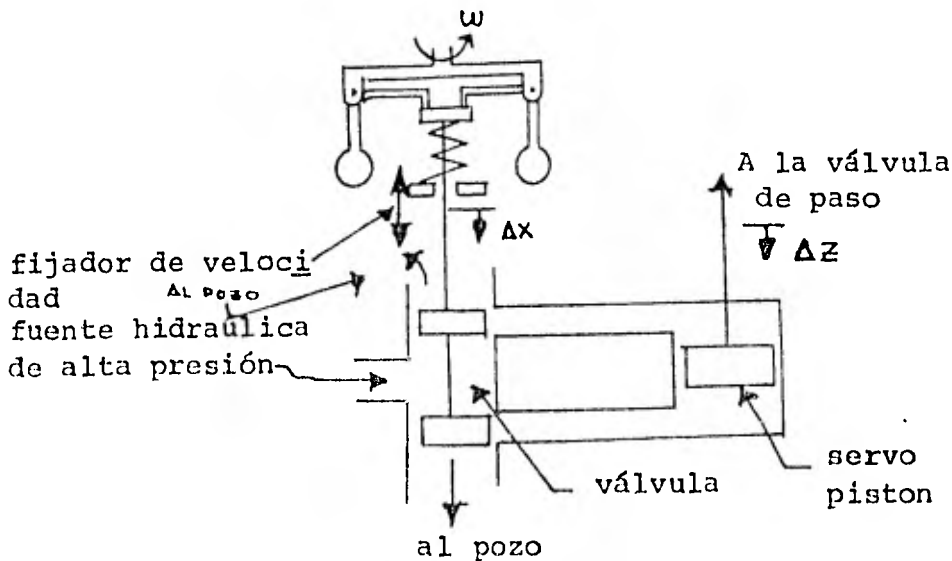


fig. 2.5

CABEZAL DE BOLA CON AMPLIFICADOR HIDRAULICO.

2.3 EL REGULADOR CON AMPLIFICACION HIDRAULICA Y CAIDA .

Para obtener amplificación de potencia y característica de caída, la realimentación en forma de conexión, como se muestra en la figura 2.6 se agrega al regulador. Nótese que la configuración de la cabeza de bola está representada en una forma diferente. Este cambio es sólo para propósitos de claridad, en la incorporación del fijador de velocidad y en la introducción de la realimentación mecánica a través de la realimentación a-b.

El cambio del ajuste de velocidad se logra variando el valor de Δx_{ref} . Para un cambio de velocidad de $\Delta \omega$, la válvula de vapor cambia una cantidad Δx donde,

$$\Delta x = K \Delta \omega$$

También, un cambio en la posición de referencia Δx_{ref} provocara un cambio en la posición de la válvula de vapor. Por geometría

$$\Delta x = \left(\frac{b}{b+a} \right) \Delta x_{ref}$$

Este regulador tiene la caída y el ajuste de velocidad necesario para controlar la velocidad de un primotor que maneja un alternador en paralelo. Esta es la característica del tipo de regulador usado en turbinas de gas y vapor. Sin embargo las unidades hidroeléctricas requieren un refinamiento ex --

tra.

Las unidades hidroeléctricas están caracterizadas por su gran inercia. Es deseable por lo tanto que estas unidades -- cuenten con caída grande durante los cambios transitorios y --- una pequeña caída en estado estable.

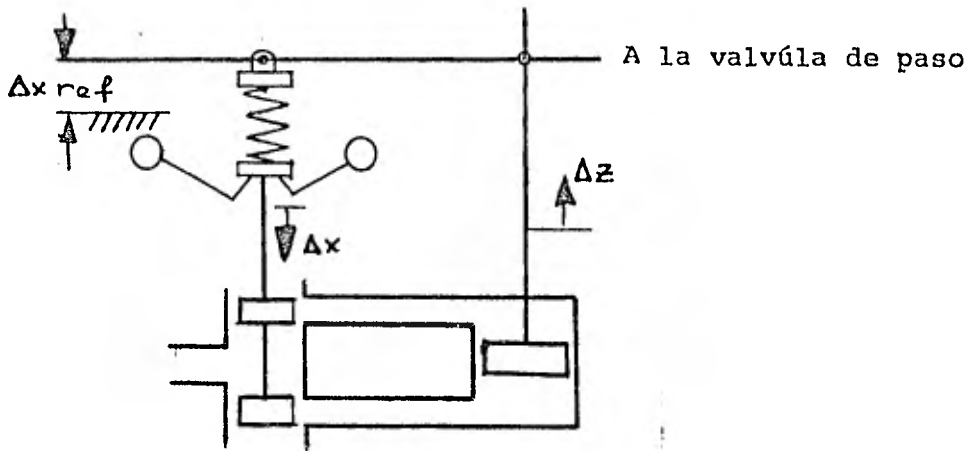


fig. 2.6

Regulador con caída. Usando realimentación

2.4 RESUMEN

Los reguladores vistos aquí son una combinación de dispositivos mecánicos. Son de uso común especialmente en unidades generadoras antiguas. Hace algunos años, aparecieron los reguladores eléctricos, con facilidad para ajustar parámetros. Estos reguladores usan circuitos de estado sólido.

La combinación de reguladores electrohidráulicos tienen también un gran uso en las nuevas unidades, especialmente en primotores de turbina de vapor.

Haremos énfasis en que hemos analizado las unidades considerando las como sistemas lineales.

En la práctica, las no linealidades, bandas muertas, límites al movimiento de las conexiones, etc, existen.

Los reguladores simplificados presentados hasta aquí, tienen caída y tienen capacidad para cambiar la velocidad de referencia. Estas 2 condiciones son necesarias para la operación en paralelo.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Control and Operation of electric power systems-Westinghouse Electric Corporation.
- 2.- Lineas de Transmisión-Theodore Wiley.
- 3.- Operación de sistemas eléctricos-Salvador Cisneros.
- 4.- Maquinas Electromagnéticas-Leander W. Matsch.
- 5.- Electric energy systems theory-olle Elgerd.
- 6.- Redes Electricas I - Jacinto Viqueira.
- 7.- Redes Electricas II - Jacinto Viqueira.
- 8.- Control automatico de sistemas electricos de potencia - Ada me Miranda (Tesis)
- 9.- Apuntes del seminario de Operación de Sistemas de Potencia-Eléctrica.