



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**CONTROL DE LA FRECUENCIA EN LOS
SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA Y
REGULADORES DE VELOCIDAD**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N:

BOJORGE AGUIRRE JOSE MARIANO

CASTILLO RODRIGUEZ GABRIEL ENRIQUE

BUENO ZAVALA AUSENCIO

DIRECTOR: ING. SALVADOR CISNEROS CHAVEZ

1984



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.

I N D I C E

CAPITULO I.- INTRODUCCION -----	1
I) DEFINICION Y CARACTERISTICAS DE UN SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA -----	1
II) CENTRAL O PLANTA GENERADORA -----	4
II.1) ALTERNADOR -----	11
II.2) SUBESTACIONES ELECTRICAS -----	13
II.3) LINEAS DE TRANSMISION -----	21
CAPITULO II.- ECUACION DE OSCILACION -----	28
CAPITULO III.- CONTROL AUTOMATICO DE LA GENERACION Y LA FRECUENCIA -----	40
III.1) ESTADISTICO DE LA CARACTERISTICA DE REGULACION -----	43
III.2) CARACTERISTICA DE GENERACION -----	44
III.3) OPERACION DE MAQUINAS EN PARALELO -----	45
III.4) CARACTERISTICA DE LA CARGA -----	47
III.5) ECUACION DINAMICA DEL SISTEMA -----	50
III.6) PROBLEMAS -----	52
III.7) CONTROL PROPORCIONAL Y CONTROL DE REPOSICION -----	59
III.8) ELEMENTOS QUE INFLUYEN SOBRE LA REGULACION -----	67
III.9) ELEMENTOS DE REPARTICION DE LA CARGA ENTRE LOS DISTINTOS GENERADORES QUE ALIMENTAN UNA CARGA -----	68
CAPITULO IV.- TIPO Y FUNCIONAMIENTO DE LOS REGULADORES DE VELOCIDAD -----	71
IV.1) INTRODUCCION -----	71
IV.2) TIPOS Y FUNCIONAMIENTO DE REGULADORES DE VELOCIDAD ---	74
IV.3) FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL REGULADOR DE VELOCIDAD --	103

C A P I T U L O I

INTRODUCCION

I) DEFINICION Y CARACTERISTICAS DE UN SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA

Definimos un sistema eléctrico de potencia, como el conjunto de elementos necesarios para producir, transmitir, transformar y distribuir la energía eléctrica para su utilización final, incluyendo todo el equipo adicional para lograr que el suministro de energía se realice con las características apropiadas de continuidad de servicio, de regulación, de tensión, de control de frecuencia. etc. Para el buen funcionamiento de las cargas dependientes del sistema eléctrico.

En la fig. I.1 se muestra un sistema eléctrico de potencia con los principales elementos que lo constituyen. Más adelante, cada elemento constitutivo se describirá en forma breve.

Los sistemas eléctricos de potencia se pueden clasificar de muchas formas, una de ellas es de acuerdo a la tensión de operación empleada y su clasificación es la siguiente:

- a) Extra alta Tensión.- Tensión mayor de 440 Kv.
- b) Alta Tensión.- Tensión mayor de 34 Kv y menor de 440 Kv.
- c) Mediana Tensión.- Tensión mayor de 1 Kv. y menor de 34 Kv.
- d) Baja Tensión.- Tensión mayor de 0.127 Kv. y menor de 1 Kv.

Todo Ingeniero Electricista puede planear un sistema que trabaje adecuadamente; y es la planeación la que puede hacer diferir entre un buen sistema y un sistema que no cubra los requerimientos -

necesarios, esto es que no cumpla con la reglamentación vigente.

Sin embargo, los sistemas son diseñados por lo general en base a un costo inicial mínimo, sin tomar en cuenta, los principios fundamentales de una buena planeación de un sistema eléctrico de potencia, la cual comprende:

Capacidad

Funcionamiento

Calidad

Confiabilidad

Seguridad

- A) Capacidad.- El sistema se debe planear para que sea capaz de conducir las corrientes de régimen establecidas; y no hay que olvidar, el proyectar, que todos los sistemas tienden a crecer y por lo tanto, es necesario prever reservas lógicas en todas sus partes.
- B) Funcionamiento.- Al proyectar cualquier sistema, debe tomarse en cuenta la posibilidad de cambios por operación o por localización, para tener accesibilidad a las instalaciones al momento de su operación y mantenimiento.
- C) Calidad.- El suministro de energía eléctrica debe realizarse con una calidad adecuada, de manera que los aparatos que utilizan la energía eléctrica funcionen correctamente.

La calidad del suministro queda definido por los siguientes factores: continuidad del servicio, regulación de voltaje y el control de la frecuencia.

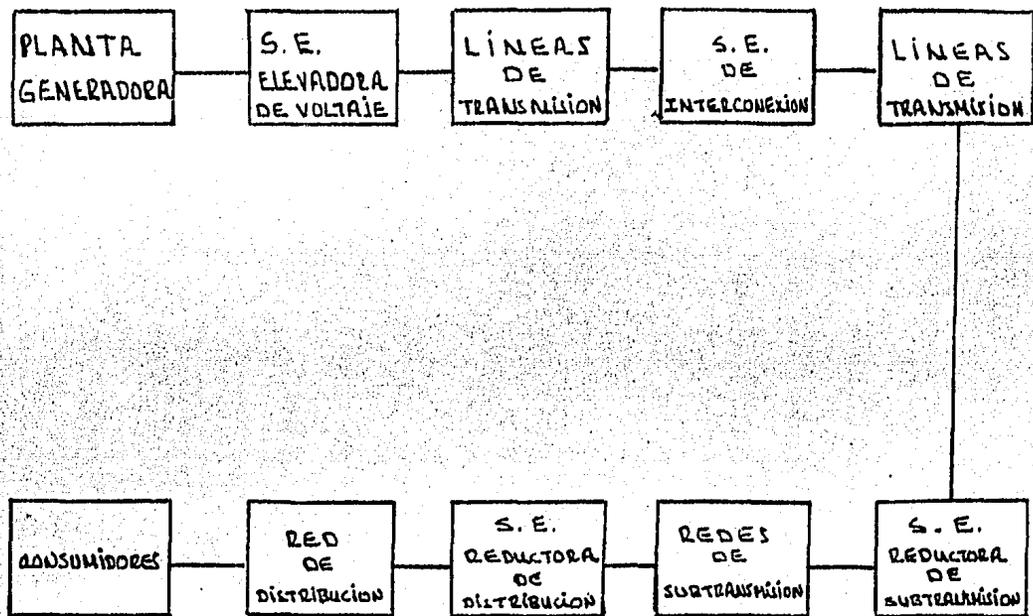


FIG. I. 1.

Es muy importante la continuidad del suministro de energía eléctrica ya que una interrupción causa trastornos y pérdidas económicas insoportables, para esto se toman ciertas disposiciones siendo estas las principales:

- a) Disponer de la reserva de generación adecuada, para hacer -- frente a la posible salida de servicio de cierta capacidad de generación.
- b) Disponer de un sistema de protección para eliminar cualquier elemento del sistema que haya sufrido alguna avería.
- c) Disponer de circuitos de alimentación de emergencia.
- d) Disponer de los medios para un restablecimiento rápido del - servicio.

Regulación de voltaje.- Es de gran importancia, ya que todos los aparatos que funcionan con energía eléctrica están diseñados para operar a un voltaje determinado; y su funcionamiento será satisfactorio siempre que el voltaje aplicado no varíe más allá de ciertos límites.

Control de Frecuencia.- El rango de variaciones de frecuencia que pueden tolerarse en un sistema depende tanto de las características de los aparatos de utilización, como del funcionamiento del sistema mismo.

Al producirse una variación de la carga conectada al sistema, se produce un desequilibrio que se refleja en una variación de la velocidad de rotación de las máquinas y en consecuencia de la frecuencia. Los reguladores de velocidad o gobernadores de cada tur-

bina registran esta variación y actúan sobre las válvulas de admisión del fluido a la turbina llegándose a un nuevo estado de equilibrio.

Los sistemas modernos controlan la frecuencia con una precisión del orden de ± 0.05 Hz.

D) Confiabilidad.- Debemos tener en cuenta al planear, que nuestro equipo sea el adecuado para el sistema de suministro, para conservar la continuidad del servicio, en base a la máxima estandarización del equipo seleccionado.

E) Seguridad.- Es importante planear los sistemas con un máximo de seguridad tanto para el equipo, como para el personal de operación y mantenimiento, tomando en cuenta que el mínimo de seguridad los obtenemos al acatar los reglamentos existentes.

Siguiendo el esquema mostrado en la fig. 1, describiremos brevemente cada una de las partes.

II) CENTRAL O PLANTA GENERADORA

Una Planta Generadora.- Es un conjunto de elementos que transforma cualquier tipo de energía potencial, calorífica, nuclear, etc. a energía eléctrica.

La producción de energía eléctrica se efectúa en la central pudiendo ser esta: Hidráulica, Geotérmica, Solar, Eólica, Térmica o Mareomotriz. La corriente es alterna, generalmente trifásica a 60 c.p.s., porque tal sistema permite, a igualdad de potencia, ma-

yor economía en la sección de los conductores respecto al alternador monofásico, y un menor costo de la maquinaria de producción y de transformación comparado con la Corriente Continua.

La elección del lugar en el cual debe ser instalada una planta de producción de energía eléctrica, depende de la región donde se presentan las condiciones naturales más favorables y de los intereses económicos de la empresa que busca convertir energía primaria en eléctrica. Es obvio que la mejor localización geográfica de las centrales o plantas es cerca de los lugares de consumo, pero, por lo general, las fuentes de energía primaria convencionales no coinciden con los puntos de mayor densidad poblacional, por lo cual estamos obligados a elegir entre:

- a) Construir plantas cercanas a las fuentes naturales y transportar la corriente eléctrica hasta los centros de consumo.
- b) Construir plantas próximas a los puntos de mayor demanda y llevar el combustible desde el lugar donde está localizada la fuente.

Cuando se trata de plantas hidroeléctricas y geotérmicas debemos considerar el lugar en que se encuentra la fuente, pero, en lo que se refiere a las plantas termoeléctricas resulta comúnmente, más económico transportar el combustible que la energía eléctrica, por lo cual, la tendencia ha sido, instalarla en la proximidad de los lugares de consumo. No obstante las alternativas mencionadas, la más frecuente y conveniente, desde el punto de vista económico y práctico, es construir las plantas productoras

de energía eléctrica lejos de las ciudades, pues además de ser - esto una alternativa, es la más factible desde el punto de vista técnico, por el notable desarrollo de las redes de transmisión eléctrica; su propia ubicación los resguarda del grave problema de contaminación atmosférica.

1.- Planta Hidroeléctrica.

Es posible definir una planta hidroeléctrica como un organismo destinado a utilizar en forma eléctrica parte de la energía que existe, potencialmente, en cualquier masa de agua que se encuentre a una altitud mayor que el nivel del mar.

Las partes principales en la estructura de una planta hidro-- eléctrica son:

- 1.- Cauce ó lecho del río.
- 2.- Presa o dique (muro de contención).
- 3.- Toma de agua.
- 4.- Canal de derivación.
- 5.- Galería (tunel bajo la montaña).
- 6.- Chimenea de equilibrio o cámara de carga.
- 7.- Conducto forzado.
- 8.- Central de máquinas
- 9.- Canal de desagüe, fuga o descarga.

2.- Planta Termoeléctrica.

Una planta termoeléctrica tiene por objeto transformar la energía calorífica proveniente de un combustible, en energía eléctrica. Esta transformación no se realiza en forma directa sino que requiere de varios pasos, los cuales se valen de tres elementos principales y su correspondiente equipo auxiliar; las partes principales que lo componen son:

- 1.- Generador de vapor ó caldera
- 2.- Turbina de vapor
- 3.- Generador eléctrico
- 4.- Equipos auxiliares
 - a) recalentadores
 - b) condensadores
 - c) torres de enfriamiento
 - d) bombas
 - e) equipo de refrigeración, etc.

Los tipos de combustible más utilizados son:

- 1.- Petróleo { Fuel-Oil
Gas
- 2.- Carbón
- 3.- Energía nuclear

Dada la importancia que en los últimos años han tenido las plantas nucleares, mencionaremos las partes principales que la forman:

- i) Combustible (uranio o plutonio)
- ii) Moderador

- iii) Refrigerador
- iv) Cubierta ó reflector
- v) Vaso ó recipiente de presión
- vi) Protector o blindaje
- vii) Control
- viii) Turbina de vapor
- ix) Generador eléctrico

Generalmente funcionan por medio de fisión nuclear, es decir por medio de la desintegración de moléculas. El moderador nos -- sirve para controlar el grado de calor que se produce.

Como refrigerantes se usan los siguientes elementos:

- a) agua pesada
- b) metales líquidos
- c) gases
- d) fluidos orgánicos o inorgánicos

Algunos tipos de reactores nucleares son los siguientes:

- 1) reactor de agua a presión
- 2) reactor de agua de ebullición
- 3) reactor de sodio-gráfito
- 4) reactor fast-breeder (reactor de cría)
- 5) reactor homogéneo
- 6) reactor con refrigerante y moderador orgánico
- 7) reactor enfriado con gas
- 8) reactor enfriado con gas a alta presión.

En los reactores nucleares se emplean muchos y muy variados materiales. Todos ellos, podemos resumirlos en los grupos siguientes:

- a) Materiales Fisionales.- Constituyen la materia prima en lo que, por fisión o escisión de sus núcleos atómicos, se desarrolla la energía calorífica necesaria. Los materiales empleados en las centrales nucleares son:

Uranio 233

Uranio 235

Plutonio 239

- b) Materiales reproductores o de recría.- Son materiales poco fisionables, en los que, por procedimientos adecuados se consiguen materiales fisionables.
- c) Materiales moderadores.- Estos materiales se utilizan para frenar la velocidad de los neutrones procedentes de la escisión de los núcleos atómicos hasta llevarlos a la velocidad de resonancia. Los más importantes son: el grafito y el agua pesada.
- d) Materiales absorbentes o reguladores.- Este tipo de material es destinado a restringir las reacciones nucleares en cadena producidas en los reactores. Los más importantes son: el Boro y el Cadmio.
- e) Materiales protectores o de apantallamientos.- Sirven para proteger al personal contra las radiaciones nocivas; se utilizan

para ello, el plomo y hormigones especiales.

- f) **Materiales reflectores.**- Son materiales que reflejan los neutrones con tendencia a escapar y el chocar con ellos, los obligan a volver hacia el núcleo del material fisionable; importante, es el circonio.
- g) **Materiales refrigerantes.**- Sirven para transportar la energía calorífica producida en los reactores nucleares hasta los cambiadores de calor y a la vez evitan el sobrecalentamiento en el núcleo del reactor, refrigerándolo. Los más importantes son: el agua, el agua pesada, el galio, el sodio, el anhídrido carbónico a presión, el helio a presión, etc.
- h) **Materiales de construcción.**- Utilizados en la construcción exterior del núcleo del reactor, cambiadores de calor, cubiertas protectoras de las varillas del combustible, etc. Son muy variados y se extienden desde las aleaciones ligeras a base de aluminio y magnesio, hasta los materiales especiales para resistir altas temperaturas y altas presiones y están constituidos por aceros de titanio, aleaciones de níquel, de berilio, etc.
- i) **Productos de escisión o subproductos atómicos,** que son a modo de escorias resultantes de la escisión de los materiales fisionables. Parte de estos productos pueden regenerarse y convertirse nuevamente en materiales fisionables; otra parte, debe retirarse periódicamente del reactor, pues constituyen venenos atómicos, muy absorbentes de electrones que pueden llegar has-

ta parar la reacción en cadena. Pueden citarse: el estroncio, carbono 14, yodo 131, xenón, samario, boro, etc.

II.1 ALTERNADOR

Como hemos dicho anteriormente, la potencia eléctrica se produce en grandes estaciones generadoras que contienen uno o más generadores de corriente alterna y un medio mecánico para impulsarlos. Comúnmente, las turbinas de vapor proporcionan potencia mecánica que, a su vez, obtienen su energía del calor liberado quemando petróleo, gas o carbón, o bien del calor de una reacción nuclear. En zonas donde existen abundantes caídas de agua, las turbinas hidráulicas proporcionan la potencia mecánica para impulsar los alternadores.

Las máquinas de corriente alterna se clasifican como: síncronas y asíncronas; las máquinas síncronas derivan su nombre del hecho de que bajo condiciones normales de operación, el rotor gira a una velocidad angular constante, la cual es llamada velocidad angular síncrona. La velocidad angular de las máquinas asíncronas, es variable y menor que la velocidad síncrona.

El alternador más sencillo funciona de la siguiente forma: Se hace girar una espira de hilo conductor entre los polos de un imán permanente; y la corriente producida en la espira se extrae por medio de dos anillos rozantes giratorios contra los cuales se mantienen apretadas unas escobillas (piezas de carbón). La dirección de la corriente dependerá de la forma en que cada media espira - - corte a las líneas de fuerza del campo magnético. Mientras media

espira pasa por la cara del polo norte del imán, la corriente circula en un sentido, y en sentido contrario cuando pasa frente a la cara del polo sur del imán.

Se genera un ciclo completo cuando la espira ha descrito un giro de 360° , por lo tanto, para generar corriente alterna de 60 Hz, esta espira debe girar 60 revoluciones por segundo (R.P.S.).

En los alternadores de las centrales, se invierten los papeles de la espira giratoria del rotor, y el imán permanente del estator. De esta forma se puede imaginar al alternador como un imán, un electroimán en la práctica, que gira en el interior de una bobina de hilo conductor. Hay dos razones importantes para disponer la máquina de esta forma; la primera es que sería difícil disipar el calor generado en el rotor móvil como subproducto de la producción de energía eléctrica, mientras que el calor generado, en el estator fijo se puede eliminar fácilmente. La segunda razón es que aparecen serios problemas mecánicos al tratar de conducir grandes corrientes eléctricas mediante anillos rozantes y escobillas. En las grandes máquinas se generan importantes cantidades de calor, por causas, tanto eléctricas como mecánicas, lo mismo en el estator como en el rotor, que obligan a incorporar a esas máquinas unos sistemas eficaces de refrigeración. Actualmente, uno de esos sistemas más común es el de refrigerar el estator, mediante agua conducida en tubos que discurren paralelos a los devanados conductores, mientras que el rotor se refrigera por medio de gas hidrogenado; el cual es muy eficaz y reduce al mínimo los pesos innecesarios.

La estipulación de la velocidad del rotor en 3600 R.P.M. no se supone ningún problema en una central térmica de carbón o de combustibles líquidos, en las que se emplean turbinas de vapor. El rotor es un electroimán de dos polos que gira a este régimen. La simplicidad de esta solución mantiene un rendimiento alto y unos costos de generación bajos.

El rotor podrá estar construido normalmente a base de un -- bloque de acero, en el que se han realizado ranuras en toda su longitud para introducir las bobinas magnetizantes y los conductos del hidrógeno refrigerante.

Cuando se presentan problemas para mantener esa velocidad del rotor como en las centrales hidráulicas, provistas de turbinas más lentas, es necesario aumentar el número de polos del rotor para la misma frecuencia de salida, cuatro polos permitirán reducir la velocidad a 1800 R.P.M., ocho polos rebajarían la velocidad a 900 R.P.M. y así sucesivamente. A estas velocidades, el peso del rotor se hace menos crítico, por lo que se tiende a construir tales máquinas multipolares con diámetros mayores y más cortas que las bipolares de igual potencia. Lo que además facilita mucho la refrigeración. Para generar la misma tensión que en las máquinas de dos polos, hay que doblar o multiplicar por cuatro el número de espiras de cada bobina del estator.

II.2 SUBESTACIONES ELECTRICAS

En el empleo de energía eléctrica, ya sea para fines industriales comerciales o de uso residencial, intervienen una gran -

cantidad de máquinas y equipo eléctrico.

Un conjunto de equipo eléctrico utilizado para un fin determinado se le conoce con el nombre de Subestación Eléctrica.

Definición:

Una Subestación Eléctrica, es un conjunto de elementos o dispositivos que nos permiten cambiar las características de energía eléctrica o bien conservarlas dentro de ciertos niveles de operación.

Clasificación de Subestaciones:

Según su función las subestaciones eléctricas se clasifican en:

- A) Subestaciones Elevadoras.- Este tipo de S.E. son las que interconectan a las plantas generadoras con las líneas de transmisión y llevan a cabo una elevación de tensión para hacer posible la transmisión de energía eléctrica a grandes distancias y en forma económica.
- B) Subestaciones de Interconexión.- Estas S.E. tienen como finalidad interconectar diferentes líneas de transmisión, directamente sí son de la misma tensión; o mediante transformadores, sí son de tensión diferente.
- C) Subestaciones Reductoras de Subtransmisión.- Este tipo de S.E. tiene como finalidad reducir la tensión para alimentar los sistemas de subtransmisión, que son las que alimentan a los consumidores.

D) Subestación Reductora de Distribución.- Esta S.E. lleva a cabo una reducción de la tensión a un valor adecuado para su distribución.

Elementos que intervienen en una S.E.

- 1.- Equipo eléctrico mayor
- 2.- Sistemas de tierras
- 3.- Barras colectoras
- 4.- Cables de control
- 5.- Transformadores de instrumentación

1) Equipo eléctrico mayor.- Este equipo lo componen los siguientes elementos que son:

a) Transformadores de Potencia

El Instituto Mexicano de Instalaciones Eléctricas da la siguiente definición de transformador.- Un transformador es un dispositivo eléctrico sin partes en movimiento, que por inducción electromagnética transforma la energía eléctrica de uno ó más circuitos a la misma frecuencia con valores combinados, de tensión y corriente. Un transformador está constituido por diferentes partes, siendo las principales:

a.1) Núcleo.- Es el circuito magnético que transfiere la energía de un circuito a otro.

Está constituido de laminaciones de acero, montadas para proporcionar un cto. magnético continuo, con

entrehierro mínimo. Las laminaciones normalmente están barnizadas, para aislarse entre sí; por lo cual se reducen las corrientes parásitas.

- a.2) Devanados.- Los devanados constituyen los circuitos de alimentación y carga; pueden ser de uno, dos, o tres fases. Su función es crear un campo magnético (en el devanado primario), e inducir una fuerza electromotriz (en el devanado secundario o terciario). Las bobinas pueden ser construidas de cobre o aluminio (alambre, barras o placas) siendo su forma -- circular, oval o rectangular; dependiendo del tipo de transformador del que se trate.
- a.3) Tanque, Recipiente o Cubierta.- Es un elemento indispensable en el transformador cuyo medio de refrigeración no es el aire; sin embargo, puede prescindirse de él en casos especiales, su función es radiar el calor producido en el transformador.
- a.4) Boquillas Terminales.- Estas boquillas son utilizadas para conectar los devanados de alta y baja tensión del transformador con sus respectivos circuitos. Permiten el paso de la corriente del transformador - evitando que exista fuga indebida de ella, protegiéndolo así contra el flameo.

a.5) Conmutadores.- Los conmutadores, combinadores de derivación, o Taps son elementos destinados a cambiar la relación de tensiones de entrada y salida, con objeto de regular el voltaje de un sistema o la transferencia de energía activa o reactiva entre los sistemas de potencia interconectados. Existen 2 tipos de ellos; el sencillo o manual que es utilizado, para hacer cambios sin carga; y el perfeccionado para hacer cambios bajo carga, por medio de una señal manual o automática.

a.6) Auxiliar.- Son aparatos que nos indican el estado en que se encuentran tanto el transformador como los niveles de aceite, temperatura, presión, etc.

b) Interruptor de Potencia.

El interruptor es un dispositivo destinado a cortar o establecer la continuidad en un circuito eléctrico.

La corriente que es capaz de interrumpir este dispositivo puede ser, la corriente nominal del sistema o la corriente de corto circuito. Los interruptores en caso de apertura, deben de asegurar el aislamiento eléctrico del circuito y deben ser capaces de disipar la energía producida por el arco eléctrico entre sus contactos sin sufrir daño.

c) Pararrayos

Es un dispositivo utilizado para derivar a tierra sobretensiones en los conductores, debidas a descargas atmosféricas.

ricas o por la operación de interruptores, eliminando de esa forma los sobrevoltajes y evitando dañar el equipo e instalaciones eléctricas de la S.E. En condiciones normales el pararrayo se comporta como un aislador y solo cuando le es aplicada una sobretensión de gran magnitud, se convierte en conductor, al desaparecer la sobretensión se convierte nuevamente en aislador, interrumpiendo la corriente que se había establecido entre fase y tierra. Su principio de operación se basa en la formación de un arco eléctrico entre dos expulsos cuya separación esta determinada de antemano de acuerdo con la tensión a la cual se va a operar.

d) Cuchillas

La cuchilla es un dispositivo que establece una apertura visible en un circuito con objeto de desconectar algún aparato o alguna línea para permitir su revisión o reparación, deben ofrecer cierta seguridad contra escapes de corriente de la parte viva hacia la parte desconectada - contra cierres intempestivos o involuntarios y contra aperturas por efectos electromecánicos de una corriente de falla intensa.

2) Sistemas de Tierras

Uno de los aspectos principales para la protección contra sobretensiones en las S.E. eléctricas es disponer de una adecuada red de tierra a la cual se conectan los neutros

de los transformadores de potencia, transformadores de corriente, transformadores de potencial, interruptores, pararrayos, cuchillas y en general todas aquellas estructuras o partes metálicas que deben estar a potencial de tierra. La necesidad de contar con una red de tierra en las S.E., es cumplir con las siguientes funciones:

- 2.1) Proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes de tierra, ya sean debidas a una falla o a la operación de un pararrayo.
- 2.2) Evitar que durante la circulación de estas corrientes de tierra, puedan producirse diferencias de potencial entre distintos puntos de la S.E. que puedan ser peligrosas para los operadores o personal que laboren en ellas.
- 2.3) Facilitar mediante sistemas de relevadores la eliminación de las fallas a tierra en el sistema eléctrico.

3) Barras Colectoras

Se llaman barras colectoras al conjunto de conductores eléctricos que se utilizan como conexiones comunes de los diferentes circuitos de que consta una subestación eléctrica.

Los circuitos que se conectan o derivan de las barras colectoras pueden ser: Generadores, Líneas de Transmisión, Banco de Transformadores, Etc.

El elemento principal de que se componen las barras colectoras, es el conductor eléctrico (conocido comúnmente como Bus).

4) Cables de Control

Aunque los cables de control y protección representan un pequeño porcentaje del costo de una S.E., es de extrema importancia su selección e instalación, desde el punto de vista de simplicidad y confiabilidad en el cableado y mantenimiento de la S.E..

Los cables de control son normalmente construidos por varios conductores (formados por alambre de cobre) aislados individualmente.

5) Transformadores para Instrumento.

Se denominan transformadores para instrumento los que se emplean para la alimentación del equipo de medición, control o protección. Los transformadores para instrumento se dividen en dos clases.

- 1) Transformadores de Corriente

- 2) Transformadores de Potencial

El elemento principal de que se componen las barras colectoras, es el conductor eléctrico (conocido comúnmente como Bus).

4) Cables de Control

Aunque los cables de control y protección representan un pequeño porcentaje del costo de una S.E., es de extrema importancia su selección e instalación, desde el punto de vista de simplicidad y confiabilidad en el cableado y mantenimiento de la S.E..

Los cables de control son normalmente construidos por varios conductores (formados por alambre de cobre) aislados individualmente.

5) Transformadores para Instrumento.

Se denominan transformadores para instrumento los que se emplean para la alimentación del equipo de medición, control o protección. Los transformadores para instrumento se dividen en dos clases.

- 1) Transformadores de Corriente

- 2) Transformadores de Potencial

II.3.- LINEAS DE TRANSMISION

La línea de transmisión es el eslabón que lleva la energía eléctrica desde la estación generadora hasta la carga. Esta constituida por los conductores, las estructuras de soporte, los aisladores y accesorios para sujetar los conductores a las estructuras de soporte y, en la mayor parte de los casos de las líneas de alta tensión, los cables de guardia para proteger la línea de las descargas directas de los rayos.

Todo conductor empleado para transmitir energía debe llenar ciertos requisitos, de acuerdo con las condiciones en que es usado, el servicio que debe desarrollar, el valor y costo de la energía, etc. De cualquier forma los requisitos fundamentales son:

- a) Requisito mecánico
- b) " térmico
- c) " regulación
- d) " de ionización o escape
- e) " económico

El orden en que son enumerados indica su importancia relativa, en el caso general; de manera que el cumplimiento del primero es absolutamente indispensable, en tanto que el último puede ser pospuesto en caso necesario.

a) Requisito Mecánico

Especifica que todo conductor debe tener la suficiente resistencia para soportar, sin romperse y sin deformarse permanentemente, los esfuerzos aplicados al mismo, en el servicio nor

mal que debe desempeñar y aún los que sean anormales pero pre-
visibles técnicamente.

En el caso de líneas aéreas, los esfuerzos normales son:

El peso del conductor y del hielo que pudiera depositarse en
zonas frías; el efecto del viento a una velocidad límite, so-
bre el conductor, con o sin hielo, los efectos de la contrac-
ción a bajas temperaturas; los esfuerzos de corte en los ama-
rres o mordazas de los aisladores; los resultados de aplicar
un instrumento cortante al conductor para desnudarlo, etc.

Los anormales comprenden: la presión de escaleras apoyadas
contra la línea; la suspensión de personal de las mismas; el
esfuerzo de los huracanes; la presión de árboles o ramas; la
tensión debida a la movilidad de los apoyos, con motivo de la
ruptura de uno o más cables, o la caída de una torre, etc.

b) Requisito Térmico

Se expresa diciendo que todo conductor debe alcanzar, en ope-
ración normal, una temperatura moderada, de acuerdo con la
clase y calidad de su revestimiento, y de las características
de su instalación; de manera que no produzca deterioro nota-
ble al primero, ni presente peligro para la seguridad de la
última.

Es obvia la importancia de la temperatura en un conductor cu-
bierto con materiales orgánicos naturales o sintéticos, pero
siempre expuestos a evaporaciones, carbonización o destrucción

en cualquier forma. Los aislamientos de hule en particular, son muy sensibles al calor, convirtiéndose en masas duras, quebradizas y sin rigidez dieléctrica, unas veces; o reblandeciéndose y desprendiéndose del conductor, otras veces.

El papel y las telas aislantes pierden con el calor elementos volátiles que le dan flexibilidad y, lentamente, se carbonizan o nitrogenan y se agrietan. El algodón impregnado pierde los aceites y resinas, y se vuelve absorbente de la humedad; solo la mica, el asbesto y el vidrio resisten temperaturas elevadas sin sufrir deterioro alguno; otros elementos resistentes al calor son los silicatos o silicones, pero aún estos materiales tienen un límite que no debe ser excedido.

Si el conductor es desnudo no hay límite de temperatura por concepto de deterioro del forro; pero sí lo hay por los siguientes motivos:

- b.1) La resistencia óhmica del conductor del cobre aumenta - un 37% por cada 100°C arriba de 35°C, lo que hace mayores las pérdidas por efecto de Joule, y la regulación de la línea, es decir, la pérdida resistiva de potencial.
- b.2) La dilatación exagerada del conductor puede ser causa de un acercamiento a tierra u otros conductores de nivel inferior, en forma peligrosa, por tal motivo los conductores situados en la misma vertical, deben estar separados especialmente.

- b.3) El aire que rodea a un conductor muy caliente, y a potencial elevado, es fácilmente ionizable y puede dar lugar a una descarga coronaria permanente, con radio-interferencia, corrosión química y disipación de energía.
- b.4) La dilatación del herraje de un aislador que soporta un conductor muy caliente, puede ser causa de deterioro más o menos grave del aislador, a causa de esfuerzos internos anormales
- c) Requisito de Regulación

Se entiende por regulación, el cambio de tensión en una carga alimentada por un generador o transformador de potencial invariable, cuando dicha carga se reduce progresivamente hasta cero; se expresa en valor absoluto por la diferencia entre la tensión máxima y la normal; o en por ciento, por el cociente de esa diferencia entre la tensión normal (nominal) multiplicado por 100. Por ejemplo, una carga recibe 220 V. en operación normal; pero al desconectar paulatinamente esa carga, la tensión sube a 224.4 V. se dice entonces que la regulación es de 4.4 V.

Como la causa de la regulación es la caída de potencial en los conductores de alimentación, la regulación está íntimamente ligada a las características de la línea; recíprocamente, las constantes de una línea determinan la regulación de ella. Es necesario, no solamente proveer a los generadores del sis-

tema, de regulación de campo, y aplicar a los alimentadores suficientes reguladores de potencial, que mantengan constante la tensión en los cables distribuidores secundarios; sino también limitar las caídas de potencial en las líneas de transmisión y distribución, y en las instalaciones interiores, para que la regulación sea pequeña, y la tensión en los receptores quede dentro de límites aceptables.

Como quiera que sea, la corriente que usa cada receptor debe ser llevada hasta él en condiciones apropiadas, para que el servicio que ese receptor desempeña, sea satisfactorio.

d) Requisito de Ionización o Escape

En los conductores con forro, usados en líneas de tensión baja o mediana, la cubierta aislante impide normalmente cualquier escape de corriente, sí el tipo de aislamiento y su cantidad están apropiados para las condiciones del lugar y la forma de la instalación. Pero si la tensión de la línea es elevada, la energía puede escaparse del conductor aunque esté forrado, debido a un fenómeno característico de las tensiones mayores de 15 o 20 KV.

El aire que está en contacto con un conductor desnudo, se halla sometido a un esfuerzo dieléctrico, más o menos intenso, que puede ser causa de ionización. Cuando el potencial del conductor va creciendo a partir de cierto límite, se produce en primer lugar una ionización invisible en los puntos más salientes y rugosidades del conductor; la extensión de las áreas

afectadas va en aumento, y llega hasta cubrir toda la superficie del conductor. Después la ionización gana en volumen a medida que sube el potencial; se hace sonora y visible, cada vez más, hasta que una descarga violenta entre los polos opuestos inicia un arco que obliga a suspender la corriente y el servicio de la línea.

Naturalmente la tensión de trabajo normal de la línea no debe llegar jamás al extremo más alto del fenómeno; pero tampoco debe permitirse que sobrepase exageradamente al valor crítico de ionización por tiempo largo, a causa de los efectos nocivos sobre los conductores y el sistema.

e) Requisito Económico

Si para transportar una potencia determinada, a cierta distancia y con una tensión dada, se emplean conductores delgados, el costo de la línea y los gastos posteriores, derivados del capital invertido, serán pequeños; pero la energía disipada por Joule será muy grande, y su valor podrá exceder y anular cualquier economía que pudiera provenir del poco capital invertido. Si por el contrario se emplean conductores de calibre excesivo, la pérdida de energía podrá resultar despreciable; pero los gastos derivados del capital invertido serán tan grandes que la línea no será costeable. En ambos casos, la pérdida en efectivo será demasiado grande, y la explotación resultará antieconómica.

En un término medio está la solución apropiada; ni demasiado gasto de capital, ni demasiada disipación de la energía. A este problema, se dá la siguiente solución:

Cuando la energía por efecto de Joule tiene un valor fijo por unidad, independiente del costo que puedan tener los conductores; la sección más económica es aquella que hace iguales los gastos por concepto de capital invertido y por concepto de energía disipada.

Esta solución se conoce como La Ley de Lord Kelvin y se basa en la observación de que el peso, costo inicial, y gastos derivados del capital invertido en un conductor desnudo, son proporcionales dentro de ciertos límites, al área de la sección recta del mismo; mientras que, para una corriente dada, el efecto de Joule es inversamente proporcional a dicha sección. En consecuencia el producto de multiplicar los gastos por concepto de capital, y los gastos por concepto de energía; es constante, cualquiera que sea el calibre, puesto que unos aumentan cuando los otros disminuyen y viceversa. Luego, según un antiguo teorema de aritmética, la suma es mínima cuando los factores son iguales.

C A P I T U L O I I

ECUACION DE OSCILACION

En el análisis de una Máquina Síncrona, es necesario aplicar las leyes de la rotación, para eso se requiere del conocimiento de las unidades fundamentales del sistema m.k.s. que son el metro, kilogramo y segundo; de estas unidades se derivan otras que nos servirán para el análisis rotacional de una Máquina Síncrona en el aspecto mecánico-eléctrico.

Para tratar la rotación, se deberá introducir primero el concepto de ángulo.

Un ángulo se define con referencia a un arco circular con su centro en el vértice del ángulo, como la relación de arco "s" a radio "r", o sea:

$$\theta = \frac{s}{r} \quad 1.$$

La unidad del ángulo es el radián. Se define la velocidad angular "w" como:

$$w = \frac{d\theta}{dt} \quad 2.$$

Y la aceleración angular (α) como:

$$\alpha = \frac{dw}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad 3.$$

Las unidades del par pueden expresarse en newton-metro, pero no es conveniente, ya que es igual a una unidad de trabajo. Por razones que más tarde se verán, la unidad del par se puede dar en

joules por radián.

El par requerido para girar un cuerpo, basándose en la tercera ley de Newton es:

$$T = J\alpha \quad 4.$$

Donde "J" es conocido como Momento de Inercia del cuerpo, cuya unidad en el sistema m.k.s. es $\text{Kg}\cdot\text{m}^2$; el momento de inercia es diferente para todo cuerpo en rotación.

Si suponemos que el par es el resultado de un número de fuerzas tangenciales "F" actuando en diferentes puntos del cuerpo, o sea

$$T = \sum rF \quad 5.$$

y cada fuerza actúa a través de una distancia $ds = r d\theta$, y el trabajo hecho es $dW = \sum F ds$ sustituyendo:

$$dW = \sum Fr d\theta \quad 6.$$

donde dW = diferencial de trabajo,
sustituyendo la ec. 5. :

$$dW = T d\theta \quad 7.$$

entonces:

$$T = \frac{dW}{d\theta} \quad 8.$$

Esta ecuación explica porque en unidades m.k.s. el par se puede

expresar en joules por radian.

Si la potencia esta dada por:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{dWd\theta}{d\theta dt} \quad 9.$$

sustituyendo 8. en 9. :

$$P = T \frac{d\theta}{dt} \quad 10.$$

Ahora de la ecuación 2.:

$$P = T\omega \quad 11.$$

La ecuación 4. establece que el par es igual al producto de la aceleración y el momento de inercia:

$$T = J\alpha \quad 12.$$

es decir:

$$T = J \frac{d\omega^2}{dt^2} \quad 13.$$

Donde "T" es el par neto o suma algebraica de todos los pares que actúan sobre el rotor de la máquina, incluyendo el par en el eje (debido al primotor), el par debido a las pérdidas rotacionales (fricción y pérdidas en el núcleo) y el par electromagnético.

Sea: "Tm" el par en el eje, corregido debido a las pérdidas rotacionales.

y "Te" el par electromagnético.

El par que produce el movimiento en los generadores es el par mecánico " T_m ".

Si el par eléctrico es igual al par mecánico entonces; $\sum T = 0$, es decir: $T_m - T_e = 0$ 14.

Ambos se toman positivos para la acción del generador, es decir, con entrada mecánica y salida eléctrica y son negativos para la acción del motor.

El par neto que produce aceleración es la diferencia algebraica del par de aceleración en el eje y el par electromagnético:

$$T_r = T_m - T_e \quad 15.$$

En régimen permanente esta diferencia es cero y no hay aceleración. Durante las perturbaciones consideradas en el estudio de estabilidad transitoria, ésta diferencia existe y hay aceleración o retardación, dependiendo si el par es positivo o negativo.

El problema consiste ahora en resolver la ec. 13. para determinar la posición angular " θ " del rotor de la máquina como función del tiempo " t ".

Es más conveniente medir la posición angular y la velocidad angular con respecto a un eje de referencia que gira a la velocidad de sincronismo, que medirla con respecto a un eje estacionario.

Teniendo la ecuación de referencia:

$$\theta = \omega_s t + \delta \quad 16.$$

Donde ω_s es la velocidad angular de sincronismo y δ es el desplazamiento angular del rotor con respecto a un eje que gira a la velocidad de sincronismo.

Derivando con respecto al tiempo la ec. 16. se tendrá:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_s + \frac{d\delta}{dt} \quad 17.$$

y

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d^2\delta}{dt^2} = \alpha \quad 18.$$

Sustituyendo en la ecuación 13:

$$T = J \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad 19.$$

En condiciones estables θ varía y δ permanece constante, por lo cual es más conveniente utilizarla.

Escribiendo el par en función de la ec. 15.:

$$T_r = J \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_m - T_e \quad 20.$$

La ecuación 20. se puede escribir de la siguiente forma:

$$P_r = M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \text{ [P.U.]} \quad 21.$$

Donde:

M es la inercia efectiva

P_m es la potencia de entrada en el eje, corregida debido a las pérdidas rotacionales.

P_e es la potencia eléctrica de salida, corregida debido a las pérdidas eléctricas.

$P = P_m - P_e$ es la potencia de aceleración, o diferencia entre potencia de entrada y de salida, cada una corregida por pérdidas.

La ecuación 21. se conoce como la Ecuación de Oscilación y puede escribirse para cada máquina del sistema.

La razón de que en la ecuación de oscilación sean utilizadas generalmente potencias en lugar de pares es porque son más fáciles de medir; y es válido por lo siguiente.

Si tenemos una potencia:

$$P_r = T \omega \quad 22.$$

Donde "P" y "T" están en unidades convencionales.

Y una potencia base:

$$P_b = T_b \omega_b \quad 23.$$

Si hacemos el cociente tenemos:

$$\frac{P_r}{P_b} = \frac{T \omega}{T_b \omega_b} = P_{rb} \text{ [P.U.]} \quad 24.$$

"Prb" expresada en valores en por unidad

Entonces:

$$P_{rb} = T_{rb} \frac{w}{w_b} \quad 25.$$

Donde "T" está en por unidad. Ya que el sistema está en operación:

$$\frac{w}{w_b} \approx 1 \quad 26.$$

Por lo tanto:

$$P_{rb} = T_{rb} [P.U.] \quad 27.$$

En estudios prácticos de estabilidad, "Pr" generalmente se expresa en por unidad, δ en grados eléctricos y "t" en segundos. Para entender el cambio de "J" por "M" en la Ecuación de Oscilación, se hará el siguiente análisis.

Si sabemos que:

$$P_p = \frac{\theta_a}{\theta_m} = \frac{w_a}{w_m} = \frac{\alpha_a}{\alpha_m} \quad 28.$$

donde "Pp" es igual al número de pares de polos

Además:

$$\alpha_a = p^2 \delta \left[\frac{\text{rad}}{\text{seg}^2} \right] \quad 29.$$

donde: $p^2 = \frac{d^2}{dt^2}$

De la ecuación 28. despejando tenemos:

$$\alpha_m = \frac{\alpha_a}{P_p} = \frac{p\delta}{P_p} \left[\frac{\text{radm}}{\text{seg}^2} \right] \quad 30.$$

Si en la máquina:

$$T_r = J \alpha_m \quad 31.$$

Sustituyendo la ecuación 30. en la 31.:

$$T_r = J \frac{p\delta}{P_p} \quad 32.$$

De la ecuación 28. tenemos:

$$P_p = \frac{W_{eb}}{W_{mb}} \quad 33.$$

Sustituyendo la ecuación 33. en 32.:

$$T_r = J \frac{W_{mb}}{W_{eb}} p\delta \quad 34.$$

Reduciendo la ecuación 34. tenemos:

$$T_r = J W_{mb} p\delta \quad 35.$$

ya que:

$$\frac{p\delta}{W_{eb}} = p\delta \quad 36.$$

Utilizando una potencia base:

$$P_b = T_r W_{mb} \quad 37.$$

Despejando el par tenemos:

$$T_{rb} = \frac{P_b}{\omega_{mb}} [kgs-m] \quad 38.$$

Y realizando el cociente de pares de la ecuación 35. y 38. para obtener unidades en p.u., entonces:

$$T_r = \frac{J\omega_{mb}}{P_b/\omega_{mb}} p p \delta = \frac{J\omega_{mb}^2}{P_b} p p \delta [p.u.] \quad 39.$$

Para continuar es necesario definir una constante que es útil, y se representa por "H", que es igual a la energía cinética a velocidad nominal dividida por la potencia aparente nominal de la máquina y es llamada Constante de Inercia.

$$H = \frac{E_b}{P_b} \quad 40.$$

Donde: "E_b" es la energía almacenada.

"P_b" es la capacidad nominal (P_b = S_b cuando f.p. = 1).

Por lo que de lo anterior:

$$H = \frac{E_b}{P_b} = \frac{(1/2)J\omega_{mb}^2}{P_b} [seg.] \quad 41.$$

Se observa que:

$$2H = \frac{J\omega_{mb}^2}{P_b} \quad 42.$$

Sustituyendo la ecuación 42. en la 39. y comparando con la ecuación de oscilación, tenemos:

$$T_r = 2H p p \delta = M \frac{d^2 \delta}{dt^2} [p.u.] \quad 43.$$

Por lo tanto $M = 2H$ y es la inercia efectiva.

Se observa que en el caso práctico, la ecuación de oscilación es conveniente representarla con la inercia efectiva; ya que el cambio de velocidad "w" antes de que se pierda el sincronismo, es tan pequeño en comparación a la velocidad nominal "w" que se puede suponer que la inercia efectiva "M" es constante.

Por lo tanto se acostumbra resolver la ecuación de oscilación considerando a "M" constante e igual a "Jw", que es el valor del momento angular a velocidad normal. Además frecuentemente el diseñador o fabricante da el valor del momento de inercia de la máquina, y su velocidad expresada en revoluciones por minuto.

Para un sistema de energía eléctrica, la ecuación de oscilación se puede escribir en incrementos, o sea:

$$\Delta T_m - \Delta T_e = J \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad 44.$$

ó siendo expresada en función de potencias de la siguiente manera:

$$\Delta P_m - \Delta P_e = M \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad 45.$$

Esta misma ecuación expresada en el tiempo:

$$\Delta P_m(t) - \Delta P_e(t) = \Delta P_r(t) = M \beta^2 \delta(t) \quad 46.$$

Y también en el dominio de la frecuencia:

$$\Delta P_m(s) - \Delta P_a(s) = M p s \delta(s) \quad [P.u.] \quad 47.$$

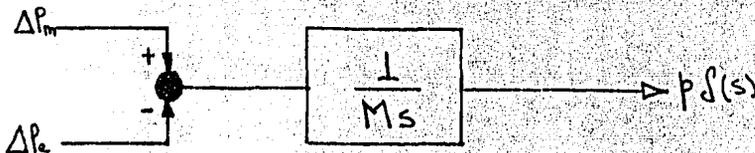
Siendo "p" y "s" el operador derivada.

La potencia " P_m ", se considera constante para la solución de la ecuación. Para un generador es válido lo anterior, aunque esté controlado por un regulador, ya que su respuesta no es inmediata. En los programas para computadoras se puede incluir el efecto del regulador.

En un sistema de varias máquinas y, por lo tanto, varias ecuaciones de oscilación, no es posible hallar la solución formal, y se necesita de una computadora para conocer la solución punto a punto. La solución da los valores de δ para diferentes tiempos y, suelen representarse gráficamente en función de "t".

Esta curva obtenida es llamada curva de oscilación. Si la curva de oscilación indica que el ángulo δ empieza a disminuir después de pasar por un máximo, se supone, normalmente, que el sistema no perderá la estabilidad.

A continuación se muestra la ecuación de oscilación en diagrama de bloques.



La función de transferencia será la siguiente:

$$F. T. = \frac{P \delta(s)}{\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)} = \frac{1}{Ms}$$

C A P I T U L O I I I

CONTROL AUTOMATICO DE LA GENERACION Y LA FRECUENCIA

Partiendo de una condición de equilibrio de un sistema eléctrico de potencia, con la frecuencia a su valor nominal (60 Hz.), cualquier cambio en la carga del sistema dará por resultado un cambio en el valor de la frecuencia, es decir, que las variaciones de frecuencia son consecuencia de los cambios de la carga y por lo tanto nos indicarán el estado del sistema. Para mantener constante la frecuencia a un valor determinado, debemos lograr el equilibrio entre la potencia generada y la carga ($P_G = P_C$); entonces es necesario contar con un dispositivo que corrige los desequilibrios que de manera constante tienen lugar en el sistema, y este es el regulador de velocidad.

Cuando la carga aumenta la máquina tiende a perder velocidad por lo cual disminuye la frecuencia y es entonces cuando interviene el regulador de velocidad, cuya función es abrir la válvula de alimentación del primotor para poder satisfacer la potencia demandada por la carga; el caso contrario sucede cuando la carga disminuye entonces la velocidad de la máquina aumenta incrementándose la frecuencia, por lo tanto el regulador actúa y cierra la válvula de alimentación hasta igualar la potencia generada con la carga demandada. Esto es $P_G + \Delta P_G = P_C + \Delta P_C$ por lo que la frecuencia resulta constante pero diferente de la inicial.

Existen 2 tipos de características de regulación para la unidad (generador y primotor) y su regulador de velocidad, que a continuación se describen:

a) Característica de generación estática

Es aquella en la que la frecuencia permanece constante para cualquier valor de potencia dado.

Su expresión gráfica es la siguiente:

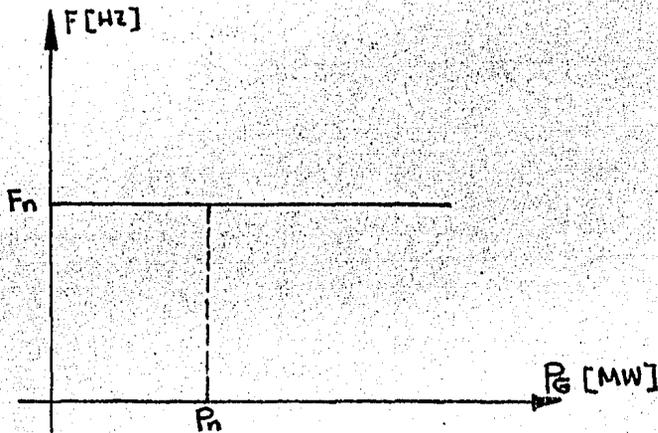


FIG. III.1.- CARACTERISTICAS DE GENERACION ASTATICA

Donde: F_n = Frecuencia nominal [Hz]

P_n = Potencia nominal [MW]

P_g = Potencia de generación [MW]

Debido a que los generadores que están regidos por este tipo de característica de regulación tienden a aceptar el valor total del incremento de carga; el conectarlos en paralelo, traería como consecuencia que la repartición de la carga sólo dependería de la rapidez de respuesta de los reguladores, originando múltiples oscilaciones antes de lograr el

estado de equilibrio. Debido a esto, su utilización se limita a los casos en que contemos con un solo generador para alimentar al sistema o cuando por diversas consideraciones deseemos que una máquina del sistema tome toda la carga.

b) Característica de generación estática.

Es aquella en la que para cada frecuencia, existe un sólo valor de potencia y su gráfica es la siguiente:

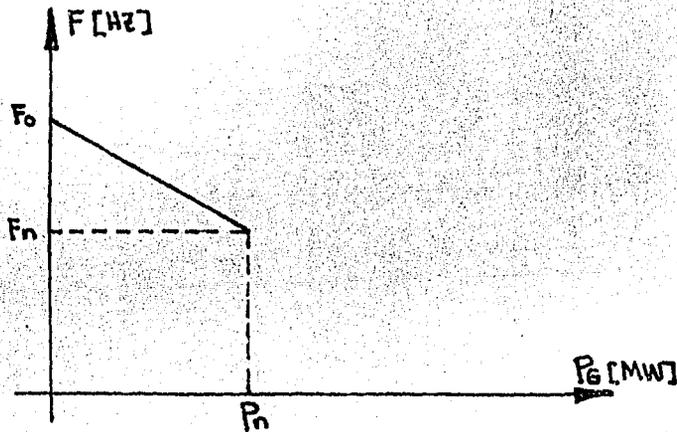


FIG. III.2.- CARACTERÍSTICA DE GENERACION ESTATICA

Donde: F_0 = Frecuencia en vacío [Hz]

F_n = Frecuencia nominal [Hz]

P_n = Potencia nominal [MW]

Para este tipo de regulación existe más de una posición de equilibrio y se efectúa controlando la posición de la válvula de alimentación del primotor.

Al incrementarse la carga repentinamente, la frecuencia no tiene un cambio significativo y por lo tanto la unidad no

ha tenido tiempo de incrementar la potencia de generación, por consiguiente la carga adicional demandada es obtenida de la energía cinética almacenada en las partes rotatorias del sistema, por lo cual decrecerá en un valor proporcional al de la carga demandada; en consecuencia, la velocidad disminuirá, por lo tanto el regulador abre la válvula del primotor y de esta manera, el generador incrementará su salida, hasta que se equilibre con la carga.

III.1.- ESTADISMO DE LA CARACTERISTICA DE REGULACION

Se define como el cambio de velocidad angular que se tiene al pasar de carga cero al 100% de carga (potencia nominal), o sea, la variación de frecuencia con respecto al cambio de carga. El estadismo se identifica con la letra "ε" y se expresa en Hertz (Hz), aunque generalmente se dá en porcentaje (%) y se identifica con la letra "E" a la que se conoce como regulación. Lo anterior se ilustra en la siguiente gráfica:

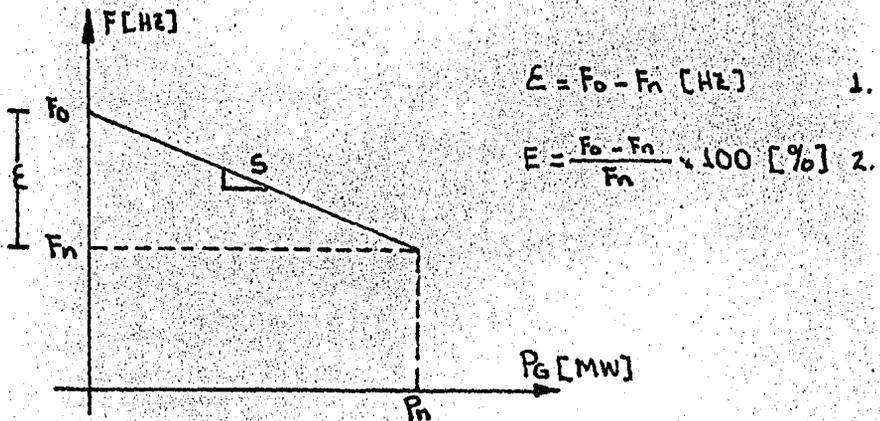


FIG. III.3.- ESTADISMO

donde: F_0 = frecuencia en vacío (Hz)

F_m = frecuencia a plena carga (Hz)

F_n = frecuencia nominal (Hz)

ξ = estatismo (Hz)

E = regulación (% ó p.u.)

P_n = potencia nominal (MW)

La característica de regulación se considera como una línea recta, aunque en realidad es una sucesión de pequeñas líneas con diferentes pendientes; sin embargo, para nuestro estudio es permisible esta consideración. Se puede apreciar en la gráfica que la pendiente "S" es negativa y se expresa de la siguiente forma:

$$S = \frac{\Delta F}{\Delta P} \left[\frac{\text{HZ}}{\text{MW}} \right] \quad 3.$$

III.2.- CARACTERISTICA DE GENERACION

Se define la característica de generación " N_G " como el inverso de la pendiente de la característica de regulación, tenemos entonces:

$$N_G = \frac{1}{S} = \frac{\Delta P}{\Delta F} \left[\frac{\text{MW}}{\text{HZ}} \right] \quad 4.$$

De la gráfica:

$$N_G = \frac{P_n}{\xi} = \frac{P_n}{E F_n} \left[\frac{\text{MW}}{\text{HZ}} \right] \quad 5.$$

La característica de generación es la cantidad de potencia que aporta la máquina gobernada, por el regulador de velocidad, por cada "Hz" de cambio en la frecuencia.

III.3.- OPERACION DE MAQUINAS EN PARALELO

En un sistema interconectado cada máquina tiene una característica de regulación y por lo tanto, tiene su propia característica de generación. Para conocer la característica de generación de todo el sistema se deben sumar las características de generación de todas las máquinas del mismo, o sea:

$$N_G S = N_{G1} + N_{G2} + \dots + N_{Gn} \quad 6.$$

Lo cual se demuestra a continuación:

Sabemos que la potencia generada por un sistema, es la suma de las potencias que genera cada máquina.

$$P_S = P_{G1} + P_{G2} + \dots + P_{Gn} \Rightarrow \Delta P_S = \Delta P_{G1} + \Delta P_{G2} + \dots + \Delta P_{Gn} \quad 7.$$

Además la frecuencia del sistema es la misma para cada máquina.

$$F_S = F_1 = F_2 = \dots = F_n \Rightarrow \Delta F_S = \Delta F_1 = \Delta F_2 = \dots = \Delta F_n \quad 8.$$

Obteniendo la característica de generación del sistema tenemos:

$$N_S = \frac{\Delta P_S}{\Delta F_S} = \frac{\Delta P_{G1} + \Delta P_{G2} + \dots + \Delta P_{Gn}}{\Delta F_S} \quad 9.$$

$$\therefore N_S = \frac{\Delta P_{G1}}{\Delta F_S} + \frac{\Delta P_{G2}}{\Delta F_S} + \dots + \frac{\Delta P_{Gn}}{\Delta F_S} = N_{G1} + N_{G2} + \dots + N_{Gn} \quad 10.$$

Quedando demostrada la ecuación 6.

Ej. Sea un sistema constituido por dos máquinas, presentándose un súbito aumento de carga de 50 MW.

U	P_n (MW)	E (%)	P_i (MW)
1	150	5	100
2	300	4	200
Σ	450	-	300

$$\Delta P_c = 50 \text{ [MW]}$$

$$F_n = 60 \text{ [Hz]}$$

$$N_G = \frac{\Delta P}{\Delta F} = \frac{P_n}{EF_n} \left[\frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \right]$$

$$N_{G1} = \frac{P_{n1}}{EF_{n1}} = \frac{150}{0.05 \times 60} = \frac{150}{3} = 50 \text{ [MW/Hz]}$$

$$N_{G2} = \frac{P_{n2}}{EF_{n2}} = \frac{300}{0.04 \times 60} = \frac{300}{2.4} = 125 \text{ [MW/Hz]}$$

$$N_G = N_{G1} + N_{G2} = 50 + 125 = 175 \text{ [MW/Hz]}$$

La disminución de frecuencia será:

$$\Delta F = \frac{\Delta P_c}{N_G} = \frac{\Delta P_{c1} + \Delta P_{c2}}{N_G} = \frac{50}{175} = 0.2857 \text{ [Hz]}$$

El incremento de potencia en cada máquina será:

$$\Delta P_{G1} = N_{G1} \times \Delta F = 50 \times 0.2857 = 14.285 \text{ [MW]}$$

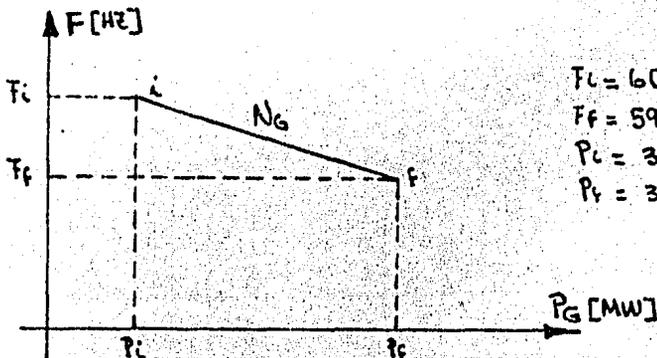
$$\Delta P_{G2} = N_{G2} \times \Delta F = 125 \times 0.2857 = 35.7125 \text{ [MW]}$$

$$\Delta P_G = \Delta P_{G1} + \Delta P_{G2} = 49.9975 \approx 50 \text{ [MW]}$$

Por lo tanto se observa que:

$$\Delta P_G = \Delta P_c$$

Gráficamente:



El incremento de carga que acepta una máquina debido a una disminución de frecuencia determinada, es directamente proporcional a su característica de generación, la cual a su vez depende directamente de la potencia nominal de la máquina e inversamente del estatismo de ésta.

III.4.- CARACTERISTICA DE LA CARGA

Quando se tiene un incremento en la carga demandada y la frecuencia disminuye, se presenta un amortiguamiento de carga y entonces menos potencia necesitará ser generada; considerándose este amortiguamiento como una contribución directa al incremento de potencia generada.

Gráficamente

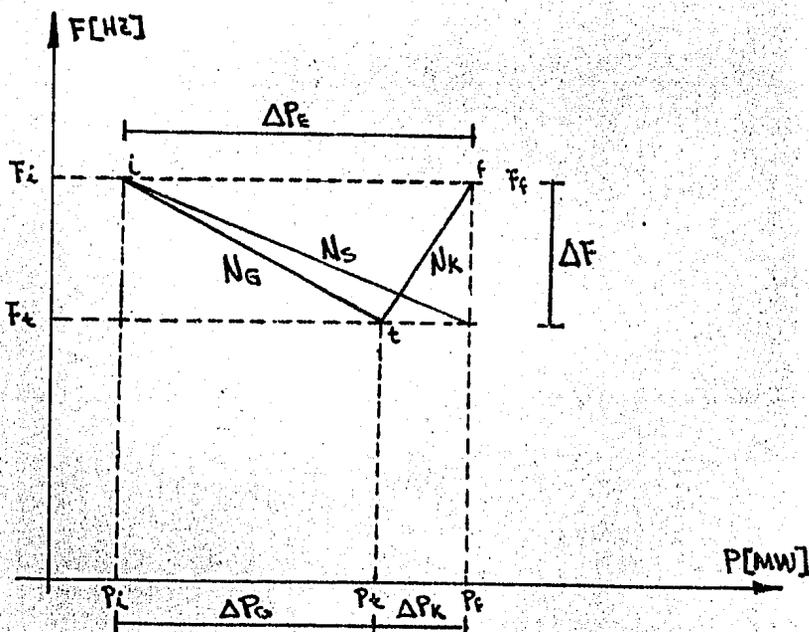


FIG. III.4.- CARACTERISTICA DE LA CARGA

donde: F_i = frecuencia inicial

F_t = frecuencia temporal

F_f = frecuencia final

ΔF = decremento de frecuencia

P_i = potencia inicial

P_t = potencia temporal

P_f = potencia final

ΔP_e = incremento total de la carga

ΔP_g = incremento en la potencia generada

ΔP_k = potencia que no se genera debido al amortiguamiento de carga

N_g = característica de generación

N_k = característica de la carga

N_s = característica del sistema

La característica de carga " N_k " se define de la sig. forma:

$$N_k = \frac{\Delta P_k}{\Delta F} \left[\frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \right] \quad 11.$$

La característica de carga " N_k " expresada en p.u., es a lo que se llama amortiguamiento de carga "D" (Damping), es decir:

$$D = \frac{\Delta P_k / P_B}{\Delta F / F_B} = \frac{\Delta P_k}{\Delta F} \times \frac{F_B}{P_B} = N_k \times \frac{F_B}{P_B} \quad 12.$$

donde: P_B = potencia base

F_B = frecuencia base

Despejando " N_k ", tenemos:

$$N_k = D \times \frac{P_B}{F_B} \left[\frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \right] \quad 13.$$

De la gráfica se observa que:

$$\Delta P_a = \Delta P_G + \Delta P_K \quad [\text{MW}] \quad 14.$$

$$\frac{\Delta P_a}{\Delta F} = \frac{\Delta P_G}{\Delta F} + \frac{\Delta P_K}{\Delta F} \quad [\text{MW/Hz}] \quad 15.$$

$$N_s = N_G + N_K \quad [\text{MW/Hz}] \quad 16.$$

En la misma gráfica se muestra como regresar a la frecuencia inicial, satisfaciendo la demanda de carga sin analizar los estados transitorios. Lo anterior se logra mediante un dispositivo adicional al regulador de velocidad, la acción de este dispositivo llamado comúnmente acelerador, seguido por la acción del regulador de velocidad, forman el control de reposición que fundamentalmente es un control de tipo integral.

La acción combinada de acelerador y regulador, ya sea en uno o varios generadores del sistema, regresan la frecuencia a su valor inicial (nominal).

En resumen, podemos decir que el regulador de velocidad actúa en 2 etapas, la primera en la cual opera un control proporcional y en la segunda un control de reposición; o sea entre el estado inicial (P_A , F_A) y temporal

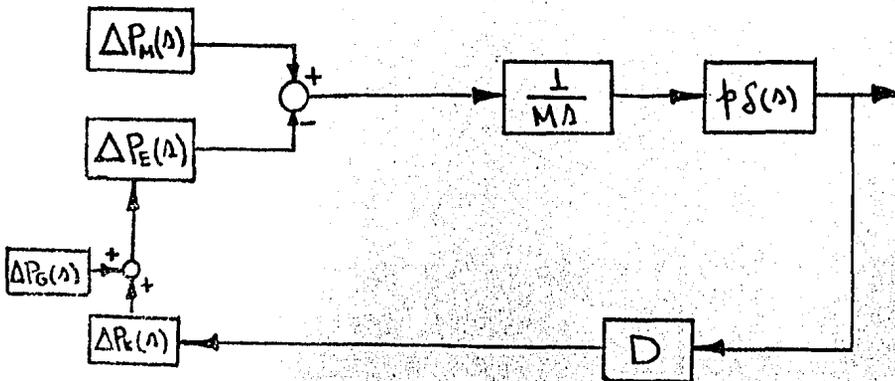
(Pt, Ft), que se ven en la FIG. III.4. va a actuar el control proporcional, el cual hace que la máquina se establezca en una frecuencia menor (Ft); y después entre el estado temporal y final (Pf, Ff) actúa el control de reposición que nos va a regresar a la frecuencia inicial (nominal), generando al mismo tiempo la potencia necesaria para satisfacer el incremento total de carga.

III.5.- ECUACION DINAMICA DEL SISTEMA

De la ecuación 47. del capítulo anterior obtuvimos la siguiente función de transferencia:

$$F.T. = \frac{pS(s)}{\Delta P_M(s) - \Delta P_E(s)} = \frac{1}{M\Delta} \quad 17.$$

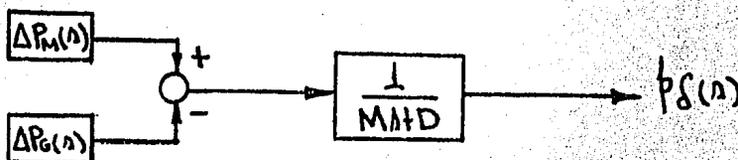
Ahora tomando en cuenta el amortiguamiento de carga del sistema, se tendrá el siguiente diagrama de bloques:



Del diagrama de bloques anterior:

$$D = \frac{\Delta P_R(s)}{p_S(s)} \quad 18.$$

por lo tanto el diagrama de bloques quedará:



siendo su función de transferencia:

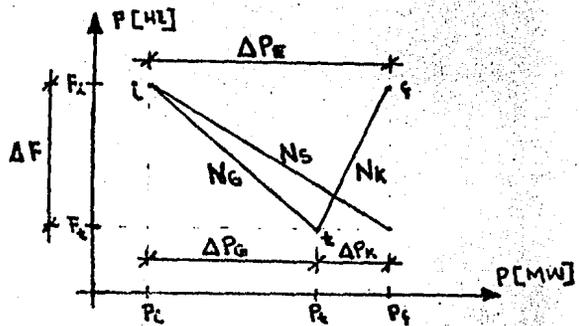
$$F.T. = \frac{p_S(s)}{\Delta P_R(s) - \Delta P_M(s)} = \frac{1}{M\Delta + D} \quad 19.$$

Que es la ecuación dinámica del sistema, tomando en cuenta el amortiguamiento de carga.

III.6.- Problemas

III.6.1.- Suponiendo un sistema formado por 4 unidades, cuyas características se dan en la tabla. Si la unidad 2 se sale de operación, calcular los incrementos de potencia que absorben las unidades restantes y la disminución de frecuencia obtenida, si existe un amortiguamiento de carga $D = 1.5\%$.

U	P_n (MW)	E (%)	P_G (MW)	P_L (MW)	ΔP_G (MW)
1	150	4	75	75	?
2	150	4	125	0	0
3	300	5	200	200	?
4	300	5	200	200	?
Σ	900	-	600	475	?



$$D = 1.5\% \quad F_i = F_n = 60 \text{ [Hz]}$$

$$\Delta F = ? \quad \Delta P_k = ?$$

$$\Delta P_E = \Delta P_G + \Delta P_K$$

$$\Delta P_E = \Delta P_{G1} + \Delta P_{G2} + \Delta P_{G3} + \Delta P_{G4} + \Delta P_K \quad ; \quad \Delta P_{G2} = 0$$

$$\frac{\Delta P_E}{\Delta F} = \frac{\Delta P_{G1}}{\Delta F} + \frac{\Delta P_{G3}}{\Delta F} + \frac{\Delta P_{G4}}{\Delta F} + \frac{\Delta P_K}{\Delta F}$$

$$\therefore N_s = N_{G1} + N_{G3} + N_{G4} + N_{GK}$$

* CALCULO DE N_G

De la ecuación 5., tenemos:

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

$$N_{G1} = \frac{P_{NL}}{E_1 F_n} = \frac{150}{0.05 \times 60} = 50 \text{ [MW/Hz]}$$

$$N_{G2} = N_{G4} = \frac{300}{0.04 \times 60} = 125 \text{ [MW/Hz]}$$

* CALCULO DE N_k

De la ecuación 13.:

$$N_k = D \frac{P_B}{F_B} ; \quad \begin{aligned} P_B &= \Sigma P_G = 600 \text{ [MW]} \\ F_B &= 60 \text{ [Hz]} \\ D &= 1.5 \text{ [p.u.]} \end{aligned}$$

$$N_k = 1.5 \frac{600}{60} = 15 \text{ [MW/Hz]}$$

* CALCULO DE N_s

$$N_s = N_{G1} + N_{G3} + N_{G4} + N_{Gk}$$

$$N_s = 50 + 125 + 125 + 15 = 315 \text{ [MW/Hz]}$$

* CALCULO DE ΔF

$$N_s = \frac{\Delta P_E}{\Delta F} \Rightarrow \Delta F = \frac{\Delta P_E}{N_s} = \frac{\Delta P_G + \Delta P_k}{N_s} = \frac{P_f - P_i}{N_s}$$

$$\Delta F = \frac{600 - 475}{315} = 0.3968254 \text{ [Hz]}$$

* CALCULO DE ΔP_G DE CADA UNIDAD

$$N_G = \frac{\Delta P_G}{\Delta F} \quad \therefore \quad \Delta P_G = \Delta F N_G$$

$$\Delta P_{G1} = 0.3968254 \times 50 = 19.8413 \text{ [MW]}$$

$$\Delta P_{G3} = 0.3968254 \times 125 = 49.6032 \text{ [MW]}$$

$$\Delta P_{G4} = 0.3968254 \times 125 = 49.6032 \text{ [MW]}$$

* CALCULO DE ΔP_k

$$N_k = \frac{\Delta P_k}{\Delta F} \quad \therefore \quad \Delta P_k = \Delta F N_k$$

$$\Delta P_k = 0.3968254 \times 15 = 5.95238 \text{ [MW]}$$

* RESUMIENDO RESULTADOS

54

$$N_s = 315 \text{ [MW/Hz]}$$

$$\Delta P_G = \Delta P_{G1} + \Delta P_{G3} + \Delta P_{G4} = 119.0477 \text{ [MW]}$$

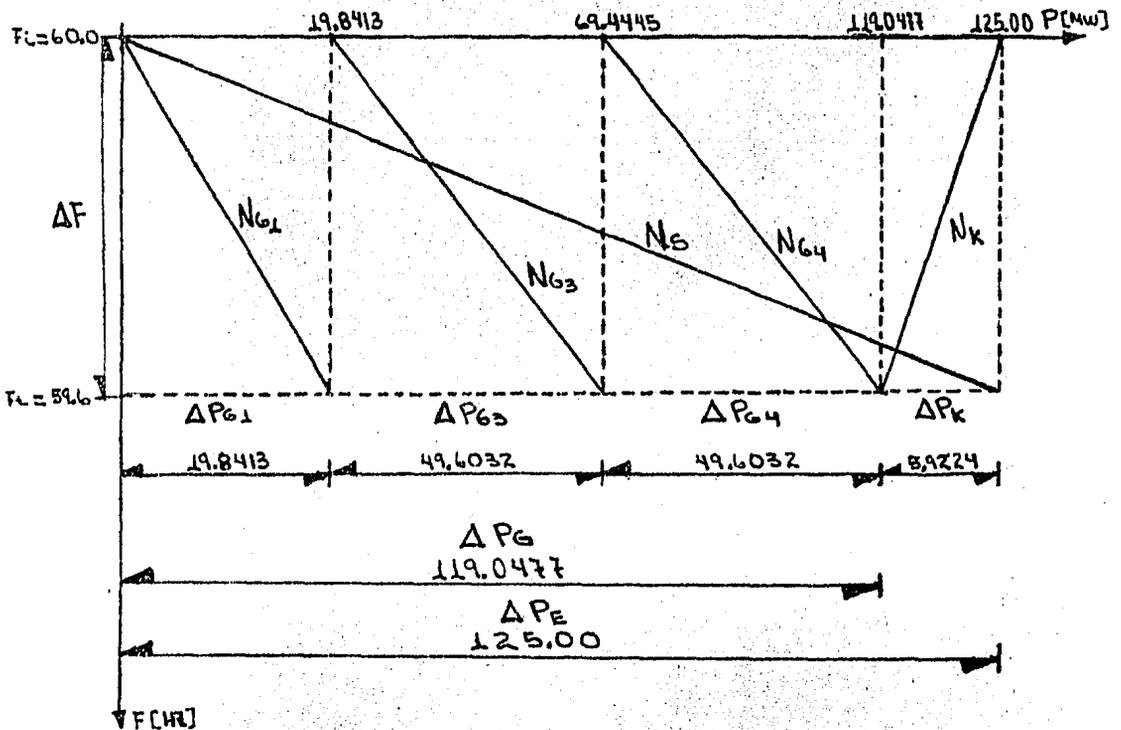
$$\Delta P_K = 5.95238 \text{ [MW]}$$

$$\Delta P_E = \Delta P_G + \Delta P_K = 125.00 \text{ [MW]}$$

$$\Delta F = 0.3968254 \text{ [Hz]}$$

$$F_L = F_c - \Delta F = 59.60317 \text{ [Hz]}$$

* GRAFICAMENTE



III.6.2.- Sea un sistema de 3 unidades, cuyas características se muestran en la tabla. Si se presenta un aumento de carga de 140 MW. Calcular el incremento de potencia de cada unidad y la variación de frecuencia, si se tiene un amortiguamiento de carga $D = 1.5\%$.

U	P (MW)	E (%)	P _i (MW)	ΔP _G (MW)
1	150	5	140	?
2	300	4	200	?
3	300	4	200	?
Σ	750	-	540	?

$$D = 1.5\% ; F_c = 60 \text{ [Hz]}$$

$$\Delta P_c = 145 \text{ [MW]}$$

$$\Delta P_R = ?$$

$$\Delta F = ?$$

* CALCULO DE N_G

$$N_{G1} = \frac{P_{i1}}{E_1 F_n} = \frac{150}{0.05 \times 60} = 50 \text{ [MW/Hz]}$$

$$N_{G2} = N_{G3} = \frac{300}{0.04 \times 60} = 125 \text{ [MW/Hz]}$$

* CALCULO DE N_k

$$N_k = D \frac{P_B}{F_B} = \frac{\Sigma P_i + \Delta P_c}{F_B} \times D$$

$$N_k = 1.5 \frac{685}{60} = 17.125 \text{ [MW]}$$

* CALCULO DE N_s

$$N_s = N_{G1} + N_{G2} + N_{G3} + N_K = 317.125 \text{ [MW/Hz]}$$

* CALCULO DE ΔF

$$\Delta F = \frac{\Delta P_e}{N_s} = \frac{P_f - P_i}{N_s} = \frac{685 - 540}{317.125} = \frac{145}{317.125} = 0.457233 \text{ [Hz]}$$

* CALCULO DE ΔP_G DE CADA UNIDAD

$$\Delta P_{G1} = N_{G1} \Delta F = 22.86 \text{ [MW]}$$

$$\Delta P_{G2} = \Delta P_{G3} = 57.154 \text{ [MW]}$$

* CALCULO P_G CADA UNIDAD

$$P_{G1} = P_{i1} + \Delta P_{G1} = 162.86 \text{ [MW]}$$

$$P_{G2} = P_{i2} + \Delta P_{G2} = 257.154 \text{ [MW]}$$

$$P_{G3} = P_{i3} + \Delta P_{G3} = 257.154 \text{ [MW]}$$

Se observa que la unidad 1 no puede proporcionar 162.86 [MW] ya que su potencia nominal es de 150 [MW], es decir, que dadas las condiciones de carga sólo puede dar 10 [MW] además de su potencia inicial de 140 [MW].

Vemos en cambio que a las unidades 2 y 3 les sobra capacidad, por lo que para resolver el problema se debe tomar en cuenta la restricción de potencia de la unidad 1.

* DISMINUCION DE FRECUENCIA CON LA UNIDAD 1

$$\Delta P_{G1} = 10 \text{ [MW]} \quad \therefore \quad \Delta F_1 = \frac{\Delta P_{G1}}{N_{G1}} = \frac{10}{50} = 0.2 \text{ [Hz]}$$

* CARGA TOMADA POR 2 Y 3 DEBIDO A ΔF_1 .

$$\Delta P_{G21} = \Delta F_1 \times N_{G2} = 0.2 \times 125 = 25 \text{ [MW]}$$

$$\Delta P_{G31} = \Delta F_1 \times N_{G3} = 25 \text{ [MW]}$$

* ΔP_k DEBIDO A ΔF_1 .

$$\Delta P_{k1} = \Delta F_1 \times N_k = 0.2 \times 17.125 = 3.425 \text{ [MW]}$$

* CARGA QUE ABSORBE EL SISTEMA CON ΔF_1 .

$$\Delta P_{E1} = \Delta P_{G1} + \Delta P_{G21} + \Delta P_{G31} + \Delta P_{k1} = 63.425 \text{ [MW]}$$

$$\text{O} \quad \Delta P_{E1} = N_{S1} \times \Delta F_1 = 317.125 \times 0.2 = 63.425 \text{ [MW]}$$

Pero el incremento total de carga es de 145 [MW] y dado que la unidad 1 no puede tomar más carga, las unidades 2 y 3 tienen que hacerse cargo del resto (ΔP_{E2}):

$$\Delta P_{E2} = \Delta P_c - \Delta P_{E1} = 145 - 63.425 = 81.575 \text{ [MW]}$$

* CALCULO DE LA NUEVA N_{S2} .

$$N_{S2} = N_{G2} + N_{G3} + N_k = 267.125 \text{ [MW/Hz]}$$

* LA NUEVA DISMINUCION DE FRECUENCIA ES:

$$\Delta F_2 = \frac{\Delta P_{E2}}{N_{S2}} = \frac{81.575}{267.125} = 0.3054 \text{ [Hz]}$$

ENTONCES:

58

$$\Delta F_e = \Delta F_1 + \Delta F_2 = 0.5054 \text{ [Hz]}$$

* CARGA TOMADA POR 2 Y 3 DEBIDO A ΔF_2

$$\Delta P_{G22} = \Delta F_2 \cdot N_{G2} = 0.3054 \cdot 125 = 38.175 \text{ [MW]}$$

$$\Delta P_{G32} = \Delta F_2 \cdot N_{G3} = 0.3054 \cdot 125 = 38.175 \text{ [MW]}$$

* ΔP_k DEBIDO A ΔF_2

$$\Delta P_{k2} = \Delta F_2 \cdot N_k = 0.3054 \cdot 17.125 = 5.23 \text{ [MW]}$$

* CARGA QUE ABSORBE EL SISTEMA CON ΔF_2

$$\Delta P_{E2} = \Delta P_{G22} + \Delta P_{G32} + \Delta P_{k2} = 81.58 \text{ [MW]}$$

$$\dot{O} \Delta P_{E2} = \Delta F_2 \cdot N_{S2} = 0.3054 \cdot 267.125 = 81.58 \text{ [MW]}$$

* RESUMIENDO RESULTADOS

$$\Delta P_{G1} = 10 \text{ [MW]}$$

$$\Delta P_{G2} = \Delta P_{G21} + \Delta P_{G22} = 25 + 38.175 = 63.175 \text{ [MW]}$$

$$\Delta P_{G3} = \Delta P_{G31} + \Delta P_{G32} = 25 + 38.175 = 63.175 \text{ [MW]}$$

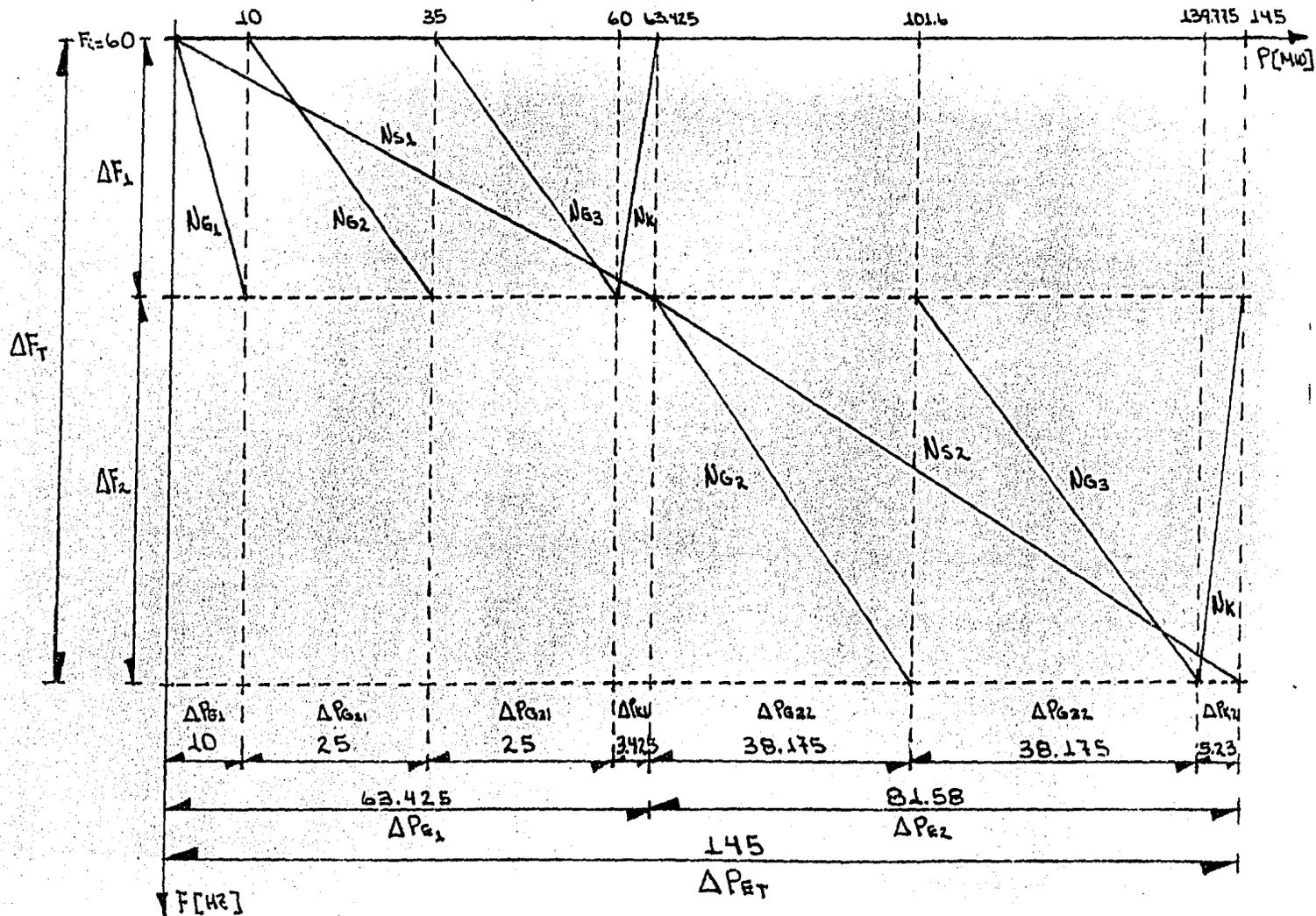
$$\Delta P_{G_T} = \Delta P_{G1} + \Delta P_{G2} + \Delta P_{G3} = 136.35 \text{ [MW]}$$

$$\Delta P_{k_T} = \Delta P_{k1} + \Delta P_{k2} = 3.425 + 5.23 = 8.655 \text{ [MW]}$$

$$\Delta P_{E_T} = \Delta P_{E1} + \Delta P_{E2} = \Delta P_{G_T} + \Delta P_{k_T} = 145.00 \text{ [MW]}$$

$$\Delta F_T = \Delta F_1 + \Delta F_2 = 0.5054 \text{ [Hz]}$$

En la siguiente página se ven gráficamente los resultados.



III.7.- CONTROL PROPORCIONAL Y CONTROL DE REPOSICION

III.7.1.- CONTROL PROPORCIONAL O DE REGULACION

El control proporcional es la acción del regulador por medio de la cual se logra el equilibrio entre la potencia generada y la carga ($P_g = P_c$), con el fin de mantener la frecuencia constante. Como se ha dicho anteriormente el regulador de velocidad aumenta la generación de la unidad cuando la frecuencia del sistema está disminuyendo, debido a un aumento en la carga; si la frecuencia del sistema está aumentando, debido a una disminución de la carga, entonces el regulador reduce la generación.

Es importante mencionar que por medio del control proporcional se estabiliza la frecuencia en un valor diferente de la nominal, satisfaciendo la carga demandada, sea mayor o menor que la inicial.

III.7.2.- CONTROL DE REPOSICION

El control de reposición sirve para reestablecer la frecuencia a su valor nominal por medio del acelerador.

El regulador de velocidad cambia la generación como consecuencia de un cambio en la frecuencia; por otro lado el acelerador cambia la generación sin haber un cambio de frecuencia previo. Sin embargo, cada acción del acelerador es seguida por una acción contraria del regulador, es decir, si el acelerador aumenta generación, la

frecuencia aumenta y consecuentemente, el regulador baja generación. La acción combinada de ambos ya sea en uno o varios generadores del sistema regresa la frecuencia a su valor nominal.

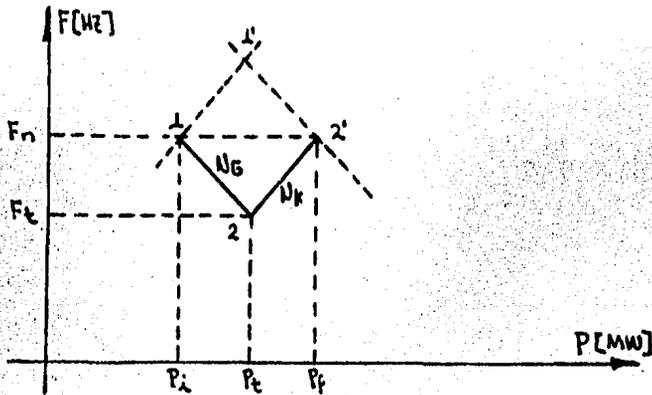


FIG. III.5.- ACCION DEL CONTROL DE REPOSICION

La acción del control de reposición se representa en la FIG. III.5 como un desplazamiento de la característica de generación paralelamente a sí misma. Por lo tanto el nuevo punto de equilibrio es ahora 2' que corresponde a (P_f, F_n) , satisfaciéndose la carga demandada a la frecuencia nominal. Se explicará mediante una gráfica como el control de reposición regresa el sistema a la frecuencia inicial (nominal), después de presentarse un aumento en la carga y por lo tanto una disminución de frecuencia.

CASO # 1.- Si tenemos $N_K = 0$ y como $N_s = N_G + N_K$, entonces:

$$N_s = N_G$$

Por lo tanto se utiliza la siguiente gráfica:

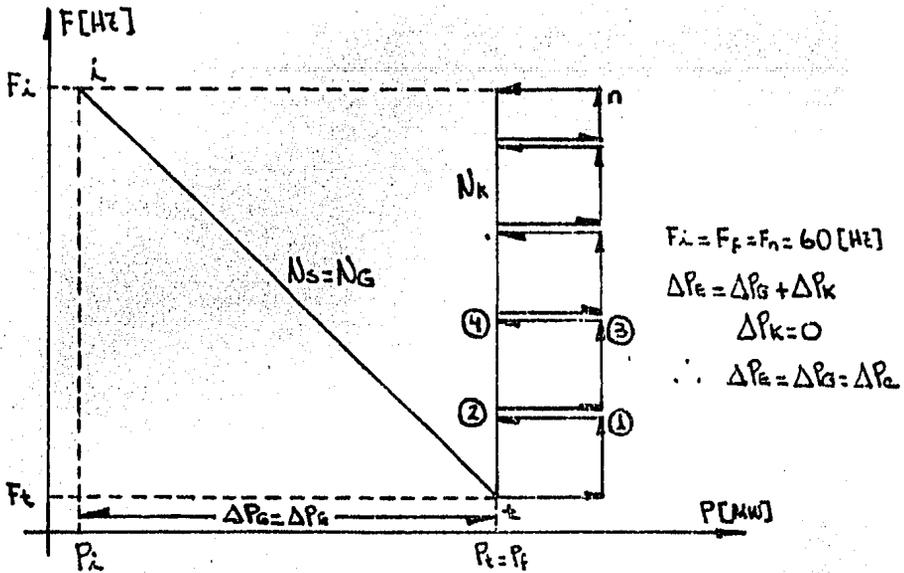


FIG. III.6.- RECUPERACION DE LA FRECUENCIA CON $N_k=0$

En un principio el sistema se encuentra en el estado inicial (P_i, F_i), generando una potencia determinada a frecuencia nominal; después del aumento de carga, el sistema llega al estado temporal (P_e, F_e), satisfaciendo la carga demandada ($\Delta P_G = \Delta P_L$), pero a una frecuencia menor que la nominal.

En este punto actúa el control de reposición de la siguiente forma:

- ① El acelerador aumenta la generación y por lo tanto aumenta la velocidad (frecuencia).
- ② Al estar incrementándose la frecuencia, el regulador reduce la generación hasta que la potencia generada es igual a la carga ($P_i + \Delta P_G = P_e + \Delta P_L$), o dicho de otra

forma, hasta que el aumento en la potencia generada es igual al aumento en la carga ($\Delta P_G = \Delta P_C$). En este punto la frecuencia que se tiene es mayor, que la del estado temporal. Se observa que en el punto ② la frecuencia sigue siendo menor que la nominal, por lo que se repite el proceso anterior, y así sucesivamente hasta recuperar la frecuencia nominal.

CASO # 2.- Si tenemos $N_k \neq 0$, entonces de la Ec. 16.:

$$N_s = N_G + N_k \quad 21.$$

Por lo tanto la gráfica a utilizar, será la siguiente:

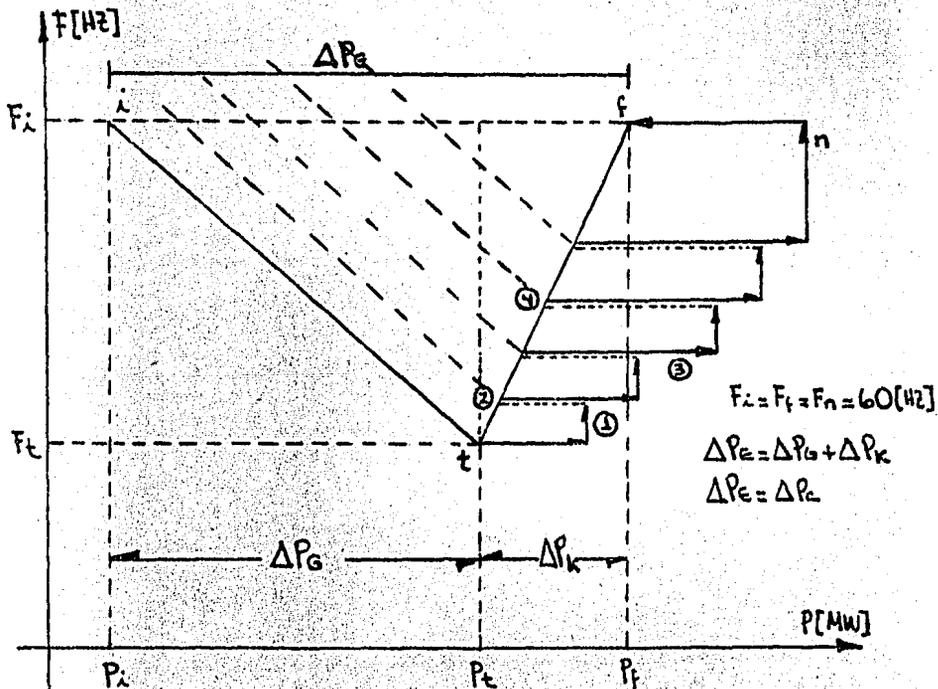


FIG. III.7.- RECUPERACION DE LA FRECUENCIA CON $N_k \neq 0$

En este caso se llega al estado temporal (P_t , F_t) en forma similar al caso anterior, pero ahora el incremento de carga (ΔP_c) se satisface mediante un aumento en la generación (ΔP_g) y un amortiguamiento de carga (ΔP_k).

En este punto se inicia la acción del control de reposición como se describe a continuación:

- ① El acelerador aumenta la generación y por lo tanto también aumenta la frecuencia.
- ② Al estar aumentando la frecuencia, actúa el regulador - disminuyendo generación, hasta que la suma de la potencia generada y el amortiguamiento de carga, son iguales a la carga demandada. Se observa que en este punto la frecuencia es mayor que la del punto "t", pero sigue siendo menor que la nominal.

El proceso mostrado en ① y ② se repetirá hasta recuperar la frecuencia nominal del sistema.

Es importante notar que a medida que aumenta la frecuencia, disminuye el amortiguamiento de carga. Cuando se haya llegado a la frecuencia nominal del sistema, el amortiguamiento de carga será cero y se estará generando el total de la potencia demandada por la carga.

Para poder observar el efecto que tienen el control proporcional y el control de reposición sobre las características esenciales del sistema, se van a tomar como referencia las siguientes gráficas:

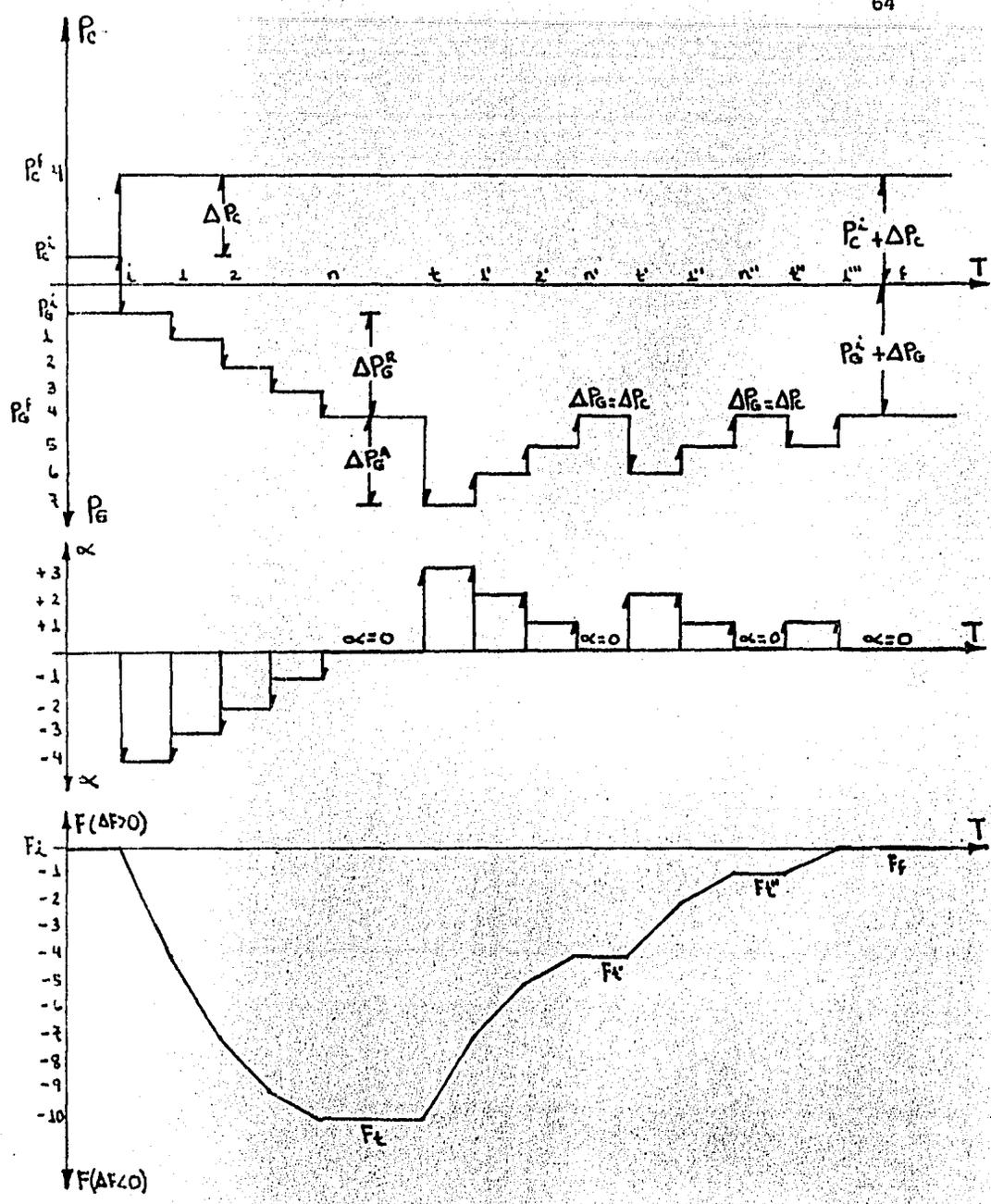


FIG. III.8.- EFECTOS DEL CONTROL PROPORCIONAL Y DE REPOSICION SOBRE EL SISTEMA

Analizando en las gráficas las condiciones anteriores al aumento de carga, tenemos:

$$P_G^i = P_G^a \quad 22.$$

$$\alpha = 0 \quad 23.$$

$$F_n = 60 \text{ [Hz]} \quad 24.$$

donde: P_G^i = potencia de generación inicial

P_G^a = potencia inicial de la carga

α = aceleración

F_n = frecuencia nominal

En el tiempo T_i se presenta un aumento en la carga (ΔP_G) lo cual produce una aceleración negativa y por lo tanto un descenso en la frecuencia. En el intervalo de tiempo ($T_1 - T_i$) no ha iniciado su acción el control proporcional.

En el tiempo T_1 es cuando el control proporcional inicia su acción aumentando la generación, por lo que disminuye la aceleración negativa, y consecuentemente la frecuencia seguirá decreciendo, con una pendiente menor.

En el tiempo T_2 se tiene un nuevo aumento en la generación, por lo cual la aceleración negativa sufre otra disminución, y por lo tanto la frecuencia seguirá decreciendo con una pendiente menor que la anterior.

Este proceso se repetirá hasta el tiempo T_n en que el incremento de la potencia generada (ΔP_G^A) sea igual al incremento de carga (ΔP_C), teniéndose una aceleración igual a cero y por consiguiente una frecuencia constante (F_t).

En el tiempo T_t se inicia la acción del control de reposición, incrementando por medio del acelerador la generación (ΔP_G^A), produciéndose una aceleración positiva, y por lo tanto un aumento en la frecuencia.

Debido al cambio en la frecuencia, actúa el regulador -- (tiempo T_r) disminuyendo generación; por lo cual disminuye la aceleración, y la frecuencia crece con una pendiente menor que la anterior. Mientras la frecuencia siga aumentando, el regulador seguirá disminuyendo generación; hasta el tiempo T_w ; cuando la potencia generada es igual a la potencia de la carga, la aceleración es igual a cero y la frecuencia es constante.

El control de reposición seguirá actuando hasta el tiempo T_f , cuando se está generando el total de la carga demandada a frecuencia nominal.

NOTA: Es importante aclarar que las curvas de la figura III.8 son continuas, pero se usaron incrementos en cada intervalo de tiempo para su mejor entendimiento.

III.8.- ELEMENTOS QUE INFLUYEN SOBRE LA REGULACION

La perturbación que se presenta durante el período transitorio de la regulación es de interés, tanto para el grupo giratorio como para el regulador de velocidad y aún para el sistema de fluido que acciona a la turbina.

En el caso de las centrales térmicas, el vapor no posee una inercia apreciable y la perturbación, con una buena aproximación, se puede restringir a la parte mecánica del complejo generador-regulador de velocidad. En el caso de las centrales hidroeléctricas, el agua posee una inercia apreciable, por lo que el sistema de regulación considera ésto, e introduce un mejor amortiguamiento, lo cual se debe tomar en consideración para el estudio del período transitorio de la regulación.

La regulación está también influenciada por las características de la red que se alimenta, la naturaleza de las cargas y en particular por la ley de variación de potencia absorbida en función de la frecuencia.

El estudio del dimensionamiento de la instalación y la selección de los parámetros característicos de la regulación están dados por las condiciones de operación más gravosas que, en el caso de una central piloto que se destina a la regulación de la frecuencia de la red, son normalmente las siguientes:

- a) Pérdida brusca de la carga total de la central, seguida de una rápida absorción de carga hasta el máximo, en el instante de la máxima velocidad.
- b) Absorción rápida de carga hasta llegar al valor máximo, seguida de una brusca desconexión de la máxima carga, en el instante de la máxima velocidad.

III.9.- ELEMENTOS DE REPARTICION DE LA CARGA ENTRE LOS DISTINTOS GENERADORES QUE ALIMENTAN UNA CARGA.

En una red eléctrica que se alimenta con más de una máquina el problema de la regulación de la frecuencia está asociado a aquel de la repartición de la carga entre las máquinas mismas. Si todas las máquinas son ajustadas para regular - con estatismo no nulo, entonces la repartición de carga resulta claramente determinada, es decir, para cada valor de la frecuencia corresponde un valor bien definido de la potencia generada por cada una de las máquinas. Por lo tanto a una variación de frecuencia (ΔF) corresponde una variación en la potencia generada por cada máquina; entonces de la Ec. 4.:

$$\Delta P_{Gi} = N_{Gi} \Delta F ; i = 1, 2, \dots, n \quad 25.$$

Y basándose en la Ec. 7.:

$$\Delta P_G = \sum \Delta P_{Gi} = \sum N_{Gi} \Delta F = N_G \Delta F \quad 26.$$

De donde:

$$N_G = \sum N_{Gi} ; i = 1, 2, \dots, n. \quad 27.$$

La capacidad reguladora de una red, es, por lo tanto, la suma de las capacidades regulantes de las máquinas individuales.

Si alguna de las máquinas del sistema se usa para regular la frecuencia a un valor fijo, es decir, como si usara un regulador del tipo astático, en tanto que a las otras se les deja un cierto margen de variación en la frecuencia, es decir, tienen un cierto estatismo mediante reguladores de tipo estático; entonces la frecuencia se fija a un valor "Fn" por medio de la máquina con regulación astática y comúnmente se le conoce como máquina piloto.

Las otras máquinas suministran la potencia que corresponde a su característica de generación, sin perder la tolerancia que se establezca alrededor de la frecuencia "Fn". Las diferencias hasta cubrir los requerimientos totales de la carga, normalmente los debe cubrir la máquina piloto.

Lo anterior significa que la máquina piloto debe tener una potencia suficientemente grande, para poder hacer frente a todas las variaciones de carga de la red.

En la práctica, el criterio de asignar un determinado estatismo a cada una de las diferentes máquinas de un sistema, se debe de seleccionar en tal forma, que se asegure

una económica y racional repartición de la carga entre las diferentes centrales del sistema. Lo anterior significa, por ejemplo, que las centrales hidroeléctricas que tienen suficiente reserva de agua deben utilizarla el máximo para aprovechar la energía, o sea, que deben operar muy cercanas a su máxima potencia disponible, con su regulador de velocidad prácticamente bloqueado o con alto estatismo.

C A P I T U L O I V

TIPO Y FUNCIONAMIENTO DE LOS REGULADORES DE VELOCIDAD

IV.1.- INTRODUCCION

Cuando se produce una variación de carga en una máquina motriz (turbina hidráulica, turbina de vapor, etc.) se modifica también el par resistente de dicha máquina; entonces la velocidad variará y será inversamente proporcional al par resistente o sea que:

Cuando aumenta el par resistente → Disminuye la velocidad

Cuando disminuye el par resistente → Aumenta la velocidad

Lo cual quiere decir que el funcionamiento de una máquina motriz sería inestable ya que con poca carga tendría tendencia a embalsarse y con mucha carga, la tendencia sería a pararse. En las instalaciones de suministro de energía eléctrica, la carga conectada a la red es muy variable y depende de los meses del año y las horas del día.

Por lo tanto hay que solucionar este problema, equilibrando en cada caso, el par mecánico de la máquina motriz con el par eléctrico de las cargas conectadas a la red. En el caso de turbinas hidráulicas, se logra graduando la entrada de -- agua, ya que la altura del salto no puede variarse; de esta forma, en caso de aumento del par resistente, la turbina recibirá más caudal hasta que su par mecánico equilibre el par eléctrico y, salvo ligera variación, la velocidad de la tur-

bina será la misma que antes de la variación de la carga; en caso de disminución de la carga, se hace lo contrario, es decir, se disminuye la entrada de agua y la turbina, que tenía tendencia a embalsarse recupera nuevamente la velocidad inicial. En el caso de turbina de vapor se produce un efecto semejante, graduando la válvula de admisión de vapor. Lo mismo podríamos decir de otras máquinas motrices. En todos los casos, debe efectuarse una regulación de la velocidad y la potencia de las máquinas motrices para que en todo momento, su funcionamiento se ajuste a las exigencias de la carga conectada a la red. Téngase en cuenta, además que la frecuencia de la red depende de la velocidad de la máquina motriz. Por lo tanto para mantener la frecuencia a un valor fijo hemos de procurar, en lo posible, que la velocidad de la máquina motriz sea constante.

En las centrales eléctricas de poca importancia ésta regulación puede hacerse ajustando manualmente la entrada de agua o de vapor en la turbina, pero esto no es posible sino en pocos casos, ya que el operario encargado del funcionamiento de la máquina ha de estar constantemente atento a las variaciones de la carga; la regulación manual es lenta y poco precisa. Generalmente, las máquinas motrices ajustan automáticamente su régimen de funcionamiento, por medio de los reguladores de velocidad.

Un regulador de velocidad como su nombre lo indica, gradúa automáticamente la velocidad de una máquina motriz, variando - -

bina será la misma que antes de la variación de la carga; en caso de disminución de la carga, se hace lo contrario, es decir, se disminuye la entrada de agua y la turbina, que tenía tendencia a embalsarse recupera nuevamente la velocidad inicial. En el caso de turbina de vapor se produce un efecto semejante, graduando la válvula de admisión de vapor. Lo mismo podríamos decir de otras máquinas motrices. En todos los casos, debe efectuarse una regulación de la velocidad y la potencia de las máquinas motrices para que en todo momento, su funcionamiento se ajuste a las exigencias de la carga conectada a la red. Téngase en cuenta, además que la frecuencia de la red depende de la velocidad de la máquina motriz. Por lo tanto para mantener la frecuencia a un valor fijo hemos de procurar, en lo posible, que la velocidad de la máquina motriz sea constante.

En las centrales eléctricas de poca importancia ésta regulación puede hacerse ajustando manualmente la entrada de agua o de vapor en la turbina, pero esto no es posible sino en pocos casos, ya que el operario encargado del funcionamiento de la máquina ha de estar constantemente atento a las variaciones de la carga; la regulación manual es lenta y poco precisa. Generalmente, las máquinas motrices ajustan automáticamente su régimen de funcionamiento, por medio de los reguladores de velocidad.

Un regulador de velocidad como su nombre lo indica, gradúa automáticamente la velocidad de una máquina motriz, variando - -

apropiadamente el flujo de energía que entra o sale de la misma.

En el caso de turbinas de gas, turbinas de vapor y motores de combustión interna, el combustible suministra la energía a la máquina motriz. Para estas aplicaciones, el regulador controla normalmente la velocidad de la máquina motriz, regulando la cantidad de combustible suministrando a dicha máquina. Es decir, que el regulador controla el flujo de combustible de modo que la velocidad del motor permanezca constante cualquiera que sea la carga (regulación astática), o que para determinada carga, el motor adopte una velocidad determinada (regulación estática).

En las turbinas de vapor, el regulador actúa sobre las válvulas que regulan el flujo de vapor a la turbina.

En las turbinas de gas, la salida del regulador esta acoplada a la válvula del carburante.

Los reguladores de velocidad son de acción directa cuando actúan directamente sobre la magnitud, y se refiere a cantidad de vapor, caudal de agua, etc., que han de controlar; o de acción indirecta cuando actúan sobre lo dicho, a través de un -- dispositivo amplificador o servomotor.

IV.2.- TIPOS Y FUNCIONAMIENTO DE REGULADORES DE VELOCIDAD

En primer lugar analizaremos los efectos del primotor y la naturaleza de la carga en la regulación, y después los propios reguladores.

El uso de la palabra "precisión" en el caso de los reguladores de velocidad implica que hay reguladores que no son precisos, o que existen varios grados de precisión en el control de los mismos. Debemos tomar en cuenta que para muchos propósitos, tales como controles de límite en el campo automotriz, resultan adecuados reguladores de poca precisión. Un ejemplo importante de este tipo de regulador es el usado en el control de la aceleración de pequeñas máquinas, como las usadas en las segadoras de pasto. En este caso un aspa plana es colocada en el chorro de aire del abanico y pivotea hacia la válvula del acelerador; al haber un incremento en el chorro de aire debido al aumento de velocidad entonces el aspa se mueve en contra de un pequeño resorte de tal forma que va cerrando la válvula del acelerador.

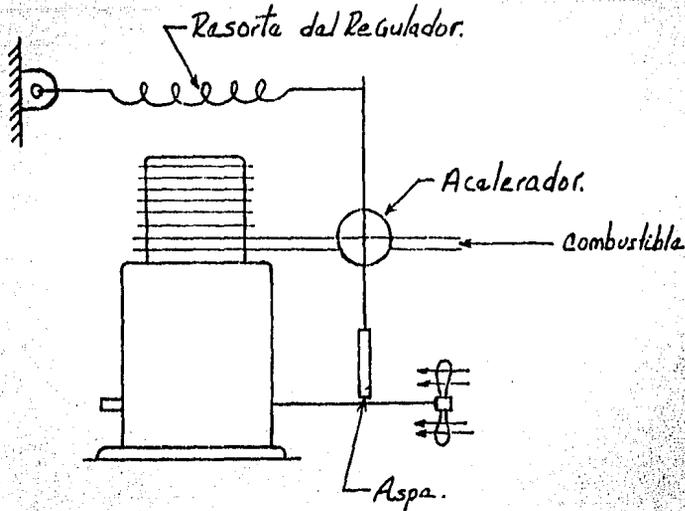


FIG. IV.1

Este tipo de reguladores son muy baratos, sin embargo son muy adecuados para determinadas aplicaciones. No obstante, si requerimos de un regulador muy preciso y que disponga de una gran fuerza para operar y controlar el acelerador, la solución no va a ser simple, ni barata.

De lo anterior se puede deducir que un regulador de velocidad debe estar formado por lo menos de dos componentes: un sensor de velocidad y un dispositivo para operar el acelerador. En los reguladores más sencillos, como el visto anteriormente, los componentes son uno solo. Sin embargo, cuando se requiere de un gran esfuerzo para operar el acelerador, se necesita un dispositivo adicional llamado servomotor, el cual es capaz de dar la fuerza necesaria y es controlado por un sensor de velo-

cidad que dispone de poca energía en su salida. De esta forma, se puede sentir el cambio de velocidad y activar el acelerador mencionado.

En la FIG. IV.2 se puede observar un sensor de velocidad de amplio rango que consiste de una bomba centrífuga, en la cual la presión se toma como un indicativo de la velocidad.

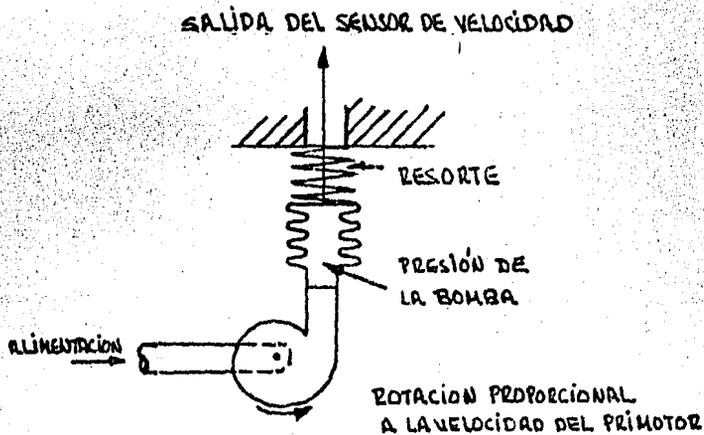


FIG. IV.2

Otros sensores utilizan un desplazamiento constante de fluido, debido a la descarga de una bomba centrífuga a través de un orificio fijo, y donde la caída de presión al cruzar el orificio nos indica el cambio de velocidad (FIG. IV.3).

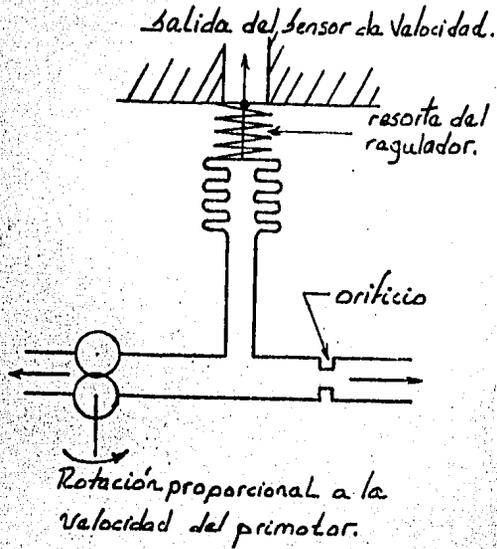


FIG. IV.3

Usando un circuito eléctrico y un pequeño generador de D.C., con un campo magnético permanente, como se ve en la FIG. IV.4, tendremos que la salida de voltaje es proporcional a la velocidad del primotor.

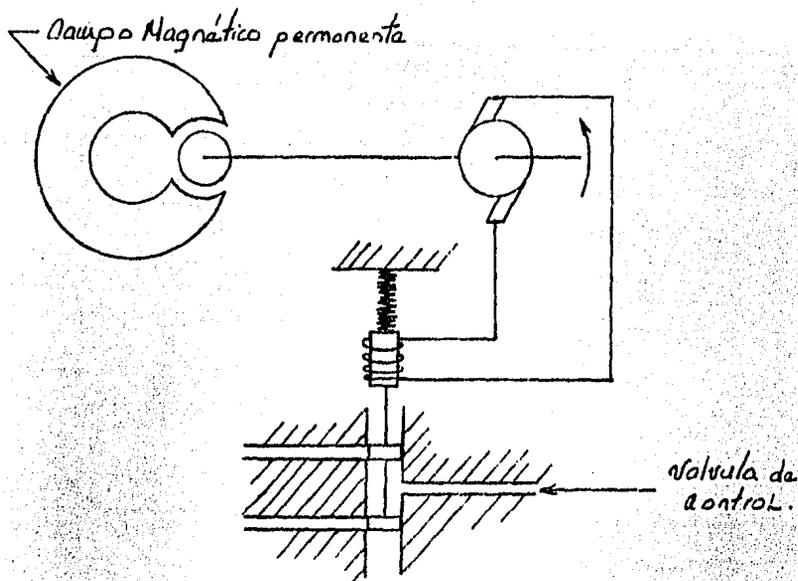


FIG. IV.4

En la FIG. IV.5 se usa un circuito análogo al anterior, en el cual se han eliminado el conmutador y las escobillas, usando un pequeño alternador magnético permanente, cuya salida es rectificadora; en este caso el voltaje de D.C. es proporcional a la velocidad.

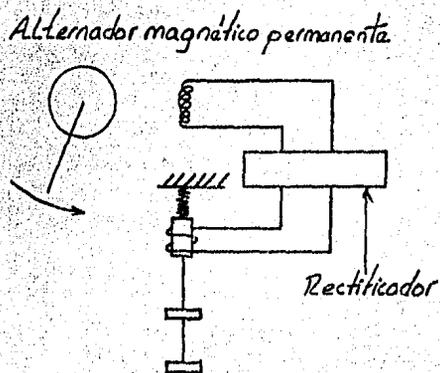


FIG. IV.5

Un tercer circuito eléctrico utiliza el alternador magnético permanente, pero su salida alimenta a una red sensible a la frecuencia, la cual nos dá a la salida una señal proporcional a la desviación de la velocidad, de un valor de equilibrio. Además también se utiliza un amplificador que nos sirve para amplificar la señal que sale de la red, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:

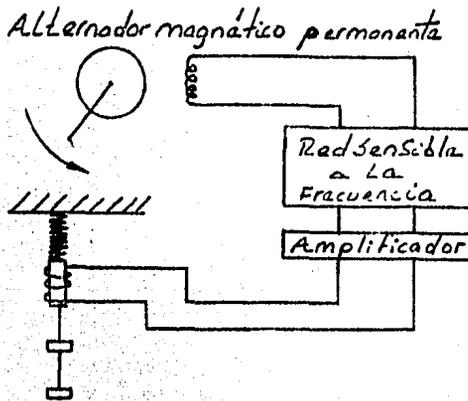


FIG. IV.6

Todos los sensores de velocidad que se han analizado anteriormente tienen sus ventajas y sus desventajas, las cuales determinan sus campos de aplicación. Para propósitos específicos se pueden usar los sensores ya vistos, pero el dispositivo sensor de velocidad preferido por su sensibilidad, resistencia y por la utilidad que tiene su salida es el llamado PENDULO ROTACIONAL.

Este mecanismo es probablemente el más antiguo y uno de los más simples sensores de velocidad. Depende para su operación -

del hecho de que se requiere una fuerza para hacer girar una masa, a través de una trayectoria circular. Esta fuerza es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad de rotación y a la distancia de la masa, al eje de rotación. El péndulo rotacional consiste de un par de pesas, generalmente esféricas, unidas a dos brazos que giran alrededor del eje de rotación, en tal forma que las pesas se mueven radialmente, en un plano perpendicular al eje. Lazos adicionales se fijan a los brazos y a un anillo que circunda al eje, como se puede observar en la siguiente figura:

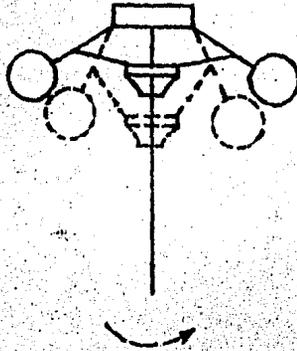


FIG. IV.7

Cuando las pesas se mueven hacia afuera, el anillo sube. La fuerza centrífuga siempre actúa en ángulo recto con respecto al eje de rotación, ejerciendo una fuerza de torsión o par, sobre el pivote, igual al producto de la fuerza por la distancia vertical de la esfera al pivote. Este par es opuesto y, si no hay otras fuerzas presentes, debe equilibrarse con el par de grave-

dad, que es igual al peso de la esfera por la distancia horizontal al pivote (FIG. IV.8).

En consecuencia, cuando la velocidad aumenta la fuerza centrífuga aumenta y la esfera se mueve hacia afuera; disminuyendo la distancia "A" del par centrífugo y aumentando la distancia "B" del par gravitacional, hasta que se alcanza un punto de -- equilibrio.

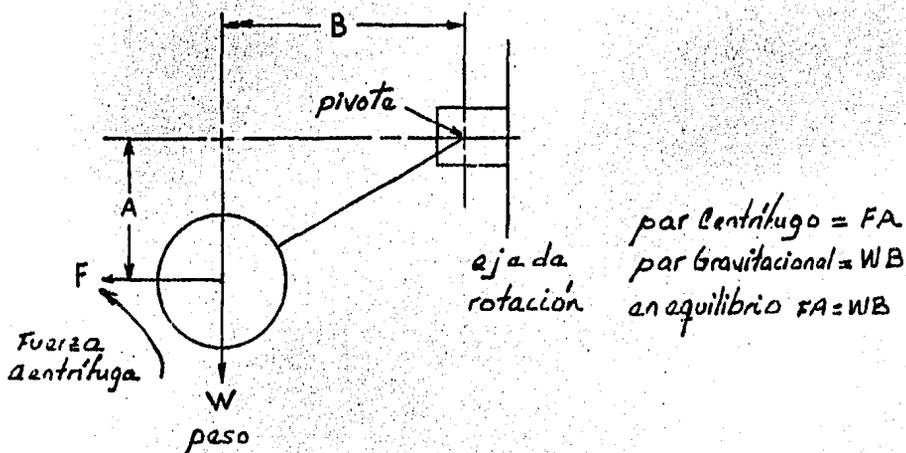


FIG. IV.8

De lo anterior se concluye, que existe una sola posición de equilibrio de las esferas y el collar para cada velocidad de rotación. En el regulador mecánico el anillo está conectado directamente a las válvulas del primotor, que tienden a cerrarse cuando las esferas se mueven hacia afuera, es decir, cuando la velocidad está aumentando. Debemos notar que existe una relación única entre la velocidad y la posición del péndulo rotacional, y

esta relación ya no existiría si añadimos fricción al sistema. Por esta razón, cuando la velocidad aumenta, partiendo de una condición de equilibrio, el par centrífugo debe alcanzar un valor igual al par gravitatorio más el esfuerzo necesario para lograr el movimiento, venciendo la fricción. Análogamente cuando la velocidad disminuye, el par centrífugo debe bajar a un valor igual al par de gravedad menos la fricción correspondiente. Lo anterior da por resultado algo llamado "BANDA NULA" o región en la cual la velocidad puede variar sin que haya alguna corrección. Es necesario minimizar esta "Banda nula", ya que provoca un fuerte tirón sobre las esferas; defecto común en los primeros reguladores mecánicos.

De lo anterior se puede concluir que para una gran sensibilidad, la fuerza disponible en el péndulo debido a un pequeño cambio de velocidad, debe ser mayor que la fuerza necesaria para el control. Para resolver este problema, existen dos soluciones: la fricción presente en todo el sistema y la fuerza necesaria para el control, deben minimizarse; o la fuerza disponible en el péndulo debido a un pequeño cambio de velocidad, debe aumentarse. La segunda solución se cumple cuando el tamaño del péndulo rotacional se aumenta, o cuando el péndulo se mueve a mayor velocidad. La primera solución implica una cuidadosa construcción para reducir la fricción, y que las válvulas sean movidas por un servomotor controlado por el péndulo. Después de varios años, el péndulo rotacional ha progresado en la forma de

su diseño, hasta alcanzar una configuración similar a la que se ve a continuación.

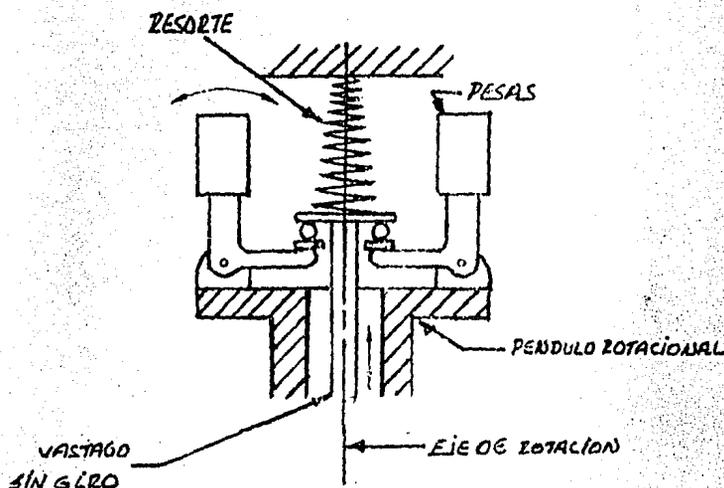


FIG. IV.9

Este péndulo rotacional consiste en dos pesas, con sus centros de masa situados aproximadamente a la misma distancia del eje de rotación y de los pivotes sobre los cuales giran. Los apoyos convierten el giro de las pesas en un movimiento axial, que se transmite a una válvula piloto por medio de un cojinete. En general, los apoyos están colocados en ángulo recto a la estructura de las pesas. La Fuerza centrífuga se equilibra con la fuerza ejercida por un resorte comprimido. En algunos diseños los apoyos están en el eje central, moviéndose en arco y presentando un corrimiento que da lugar a que haya fricción.

En otros diseños, los apoyos están en contacto con el cojinete en una línea que está a un ángulo recto a su plano de movimiento, de tal forma que el movimiento arqueado se convierte en un pequeño giro del cojinete, con un mínimo de fricción - - (FIG. IV. 10).

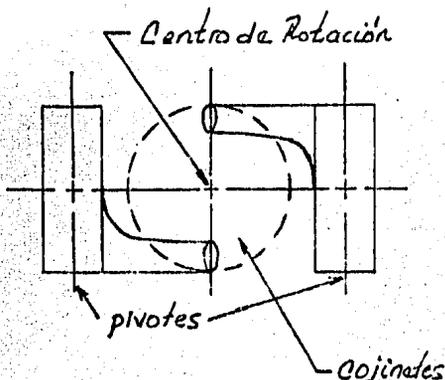


FIG. IV. 10

En diseños más precisos y sensibles, la fricción se reduce por medio de cojinetes antifriccionantes y pivotes flexibles. Todas las precauciones y medidas anteriores se usan para reducir la banda nula que es resultado de la fricción existente - en el péndulo.

Es importante notar, que la eliminación total de la fricción en el péndulo rotacional, produciría resultados indeseables. Esto se debe a que la combinación de las pesas y el resorte, forman un sistema pendular que tendería a oscilar después de cualquier perturbación, indicando una falsa desviación de la velocidad. Es necesario tener un amortiguamiento sufi-

ciente en el sistema para regresar al equilibrio después de una pequeña oscilación. Para solucionar este problema se utiliza un amortiguador, lográndose un amortiguamiento debido a la viscosidad y evitando que exista fricción en el péndulo rotacional; teniendo por resultado el amortiguamiento necesario, sin producir o ampliar la banda nula. Los péndulos rotacionales actuales son diseñados de esta forma, tomando también en cuenta otras razones. Los diseños más costosos se hacen con el fin de lograr un buen funcionamiento durante largo tiempo, sin necesidad de lubricación. En los reguladores de velocidad más simples y pequeños, la lubricación es inherente al diseño y la solución expuesta es innecesaria, ya que la cantidad de fricción requerida para un amortiguamiento satisfactorio es tan pequeña, que se puede reducir la fricción en los pivotes del péndulo y sin embargo es suficiente para tener el amortiguamiento adecuado, y al mismo tiempo es tan baja que produce una banda nula aceptable.

Como se mencionó anteriormente la fuerza necesaria para frenar las pesas, aumenta con el cuadrado de la velocidad y en proporción directa con la distancia radial del centro de gravedad de las pesas al eje de rotación. Por lo tanto, para una velocidad dada la fuerza aumentará tanto como las pesas se puedan mover hacia afuera. Se llama "escala de pesas" al rango en el cual la fuerza aumenta con el movimiento, referido al extremo de las pesas. Para un péndulo rotacional dado, esta escala es

diferente para cada velocidad, de hecho, varía proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad.

Es importante notar que mientras las pesas se mueven hacia afuera el resorte es comprimido. Por lo cual el resorte también tiene una escala, esto da por resultado un aumento en la fuerza opuesta al movimiento de las pesas; si este aumento es menor que el del péndulo para el mismo movimiento, dará lugar a inestabilidad.

Sí, por el otro lado la escala del resorte es apreciablemente más grande que la del péndulo, dará por resultado un sistema estable; teniendo una sola posición de equilibrio para cada velocidad. Escogiendo adecuadamente la proporción entre el resorte y el péndulo, se tiene un amplio rango de sensibilidad o movimiento de la válvula piloto, para un cambio de velocidad dado.

La mejor elección, sin embargo depende básicamente de la naturaleza del sistema, al cual el regulador controla.

En general, los reguladores de velocidad están formados por: un sensor de velocidad (como el visto anteriormente), en combinación con un servomotor que nos proporciona un alto nivel de potencia mecánica a la salida. Varios tipos de servomotores son dignos de consideración, pero el más apropiado para nuestras necesidades es el servomotor hidráulico de pistón recíprocante. Tres tipos de servomotor hidráulico de pistón recíprocante son

usados. Estos son el pistón de doble acción, que necesita de una válvula piloto que tenga dos controles regulando simultáneamente el flujo de aceite, hacia y desde el pistón, y que une sus cargas por medio de una biela de diámetro relativamente pequeño - - (FIG. IV.11). El pistón de acción simple, en el cual la fuerza hidráulica está bajo el control de una simple válvula piloto que debe vencer un resorte y la carga externa en una dirección. En otra situación, el resorte descarga el aceite del cilindro venciendo la carga externa en la otra dirección (FIG. IV.12). Y el pistón diferencial, en el cual la biela se vuelve bastante grande para reducir el área efectiva de un lado del pistón, a la mitad del área del otro lado. En este caso la presión que suministra el aceite se mantiene en el área pequeña del pistón y el aceite es controlado por una válvula de tal forma que fluya hacia dentro o hacia fuera del otro lado (FIG. IV.13). En todos estos casos el diseño es tal que fuerzas sustancialmente idénticas actúan en ambas direcciones del movimiento.

Los tres tipos de servo arriba mencionados son seleccionados de acuerdo a las necesidades de nuestro regulador.

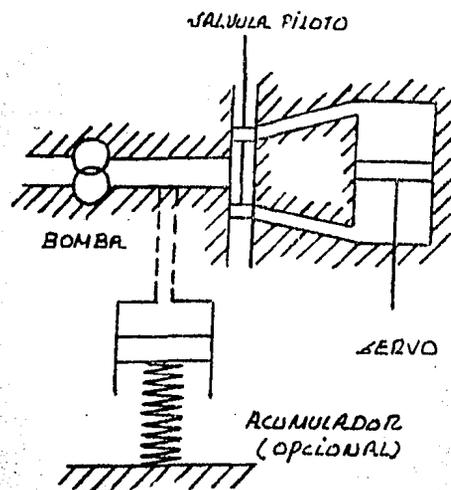


FIG. IV.11

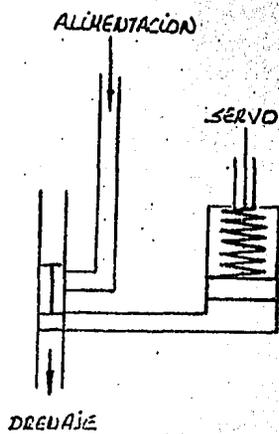


FIG. IV.12

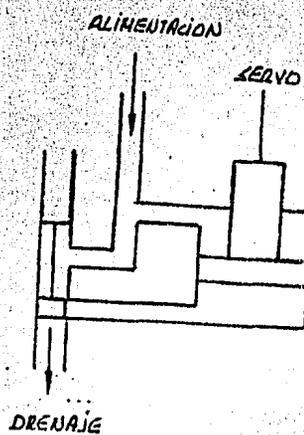


FIG. IV.13

El principio básico de operación del péndulo centrífugo y la forma general en la cual es empleado este mecanismo se ha descrito con anterioridad (FIG. IV. 9). Sin embargo, el péndulo aparece en una variedad grande, siendo el diseño dictaminado por los requerimientos específicos. Los mismos principios básicos se aplican a todos. El servo es tan simple en su principio que no requiere otra descripción de la que ya ha sido dada.

Consideremos ahora la forma más simple del regulador hidráulico, en el cual las esferas y la válvula piloto descrita controlan un simple servo de pistón recíprocante. Se asume que se realiza un adecuado suministro de aceite. Para abreviar la discusión asumamos que el regulador está controlando a un motor Diesel. El péndulo gira a una velocidad proporcional a la del motor y el servo está conectado para operar la válvula de alimentación del combustible (FIG. IV. 14). Debe notarse que la simple combinación del péndulo y válvula piloto conectados directamente, tiene una sola posición de equilibrio; la posición en la cual la válvula está cerrada y no se admite ni se descarga aceite desde el cilindro del servo.

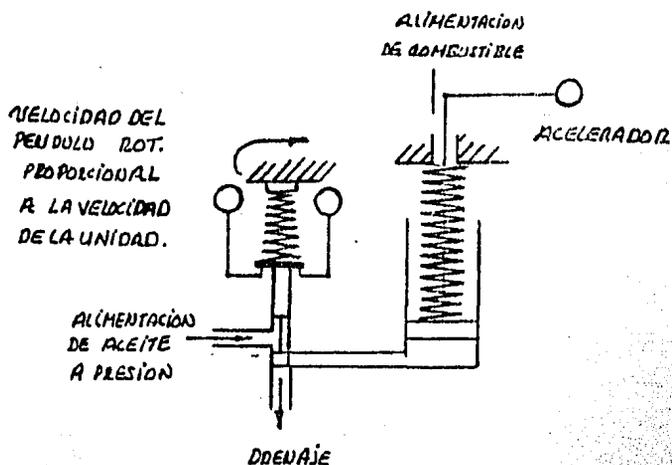


FIG. IV.14

Para un ajuste dado del resorte, el péndulo y la válvula tomarán esta posición a una sola velocidad; en otras palabras, tal dispositivo sensor de velocidad es inherentemente isócrono. Desafortunadamente, tal sistema es también inestable. Esto es porque la velocidad del motor no asume instantáneamente un valor proporcional a la posición de la válvula de alimentación, debido a la inercia del rotor. Por lo tanto, si el motor está abajo del ajuste de velocidad del regulador, la válvula piloto es posicionada para mover el servo e incrementar la alimentación de combustible. Con el tiempo, la velocidad se ajusta hasta que la válvula está centrada y el servo se detiene, pero el combustible ha aumentado demasiado y el motor continúa aumentando la velocidad. Esto mueve la válvula piloto hacia el otro lado y el combustible empieza a disminuir. Como antes, cuando la velocidad obtiene el valor correcto, la alimentación de com

bustible ha disminuido demasiado, entonces el motor baja su velocidad y el mismo ciclo se repite. Algunos medios para estabilizar tal sistema deben ser incorporados a los dos componentes que hemos descrito, para asegurar una regulación satisfactoria. El método más simple para asegurar estabilidad en el sistema, es adicionar medios que provoquen una caída de velocidad en el regulador.

IV.2.1.- REGULADOR DE CAIDA DE VELOCIDAD

Para una mejor comprensión de su funcionamiento, consideremos una analogía, con una experiencia común. Hagamos de cuenta que la máquina que va a ser controlada es un automóvil ordinario con acelerador de pie. El conductor del carro funciona como servo operando el acelerador. Para indicar la velocidad usamos un velocímetro ligeramente modificado; esto es -- reemplazamos la aguja del velocímetro con un disco sólido, el cual tendrá una mitad roja y una mitad verde, con la línea divisora donde la aguja indicadora debiera estar. Sobre la cara del velocímetro colocamos un disco opaco que tenga una ranura muy pequeña a través de la cual podemos ver lo indicado por el disco de colores. Esta ranura puede servir para ajustar la velocidad, pero nosotros asumiremos que está colocada en la marca correspondiente a 50 km/h, que es la velocidad que deseamos mantener. El conductor estará atento a

mantener esta velocidad reaccionando a la indicación de velocidad, como sigue; siempre que la ranura aparezca roja, indica una sobrevelocidad, y el acelerador se cierra completamente; si es verde el color de la ranura, el acelerador se abre completamente. Se supone que alguien irá observando el camino. Supongamos que nuestro carro marcha en equilibrio a 50 km/h y se aproxima hacia una pendiente ligera. La velocidad disminuirá, y la ranura será verde, entonces el conductor pisará el acelerador. El auto aumentará de velocidad, la indicación cambiará rápidamente de verde a roja pasando por los 50 km/h, y el conductor reacciona inmediatamente después de haber rebasado el límite, cerrando completamente el acelerador. La velocidad caerá rápidamente, pasando por los 50 km/h y el ciclo se repetirá indefinidamente. Este es un sistema sin "caída de velocidad".

Asumamos ahora que la ranura es más ancha, el límite inferior indica 45 km/h y el límite superior 55 km/h. Nuestras indicaciones al conductor son que cuando la ranura sea toda roja, lo cual ocurrirá a los 55 km/h, cierre el acelerador completamente; y que este toda verde, o sea a 45 km/h, abra el acelerador completamente. Para velocidades intermedias el acelerador tomará posiciones proporcionales. Con tal arreglo, empezando otra vez desde el equilibrio, la ligera disminución de velocidad causada por la pendiente, no cambiará la indicación a solo verde, pero sí aumentará la

parte verde, lo cual dá por resultado un pequeño aumento de combustible, y no una completa abertura del acelerador. El auto tomará la pendiente a una ligeramente reducida pero estable velocidad, y el acelerador no será completamente abierto a menos que la pendiente sea lo suficientemente severa para necesitar plena potencia a 45 km/h; este sistema sí tiene "caída de velocidad". En efecto este sistema dá al conductor (o servo) un tiempo para corregir, antes que el punto de operación sea alcanzado.

Llama la atención el hecho de que el simple regulador mecánico de pesas, en el cual el acelerador es operado directamente por el péndulo tiene una inherente "caída de velocidad," es decir, que la única forma en que la acción del acelerador pueda ser aumentada, es que las pesas se muevan hacia dentro, lo cual requiere de una disminución de velocidad. La caída de velocidad en un regulador puede ser suministrada por una interconexión mecánica entre el servo (y por lo tanto el acelerador) y el sensor de velocidad del regulador de tal forma que al aumentarse la alimentación de combustible, el ajuste de la velocidad disminuya. Tal dispositivo puede consistir simplemente de una palanca de proporción adecuada, entre el servo y el resorte del sensor de velocidad (FIG. IV.15).

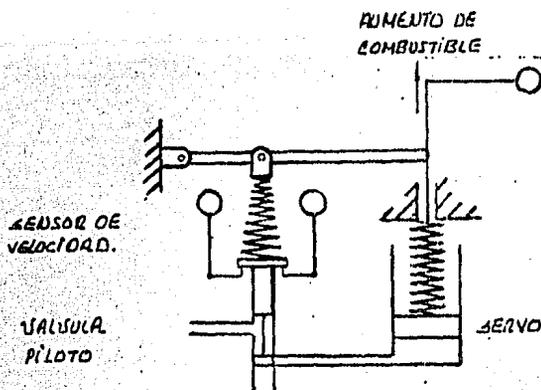


FIG. IV.15

La relación de equilibrio entre el ajuste de velocidad y la posición del servo puede ser representada por una línea descendente, que indica disminuir velocidad en el ajuste, cuando el movimiento del servo es en la dirección "aumento de combustible". Para cada posición del ajuste de velocidad, corresponde una línea descendente, como se muestra en la FIG. IV.16. En este ejemplo, se asume que el ajuste de velocidad es tal, que si el servo está en la posición extrema de la dirección "aumento de combustible" el ajuste de velocidad del regulador está en 1 000 RPM. Como el servo se mueve hacia el límite opuesto de esta posición, entonces el ajuste de velocidad se incrementa hasta 1 040 RPM. La caída de velocidad es usualmente expresada como el por ciento del cambio del ajuste de velocidad para la carrera completa del servo, referida al ajuste de velocidad en la posición de máxima alimentación de combustible.

En este caso, el regulador es ajustado para un 4% de caída de velocidad. Esta característica es una función del diseño del regulador y del ajuste de velocidad.

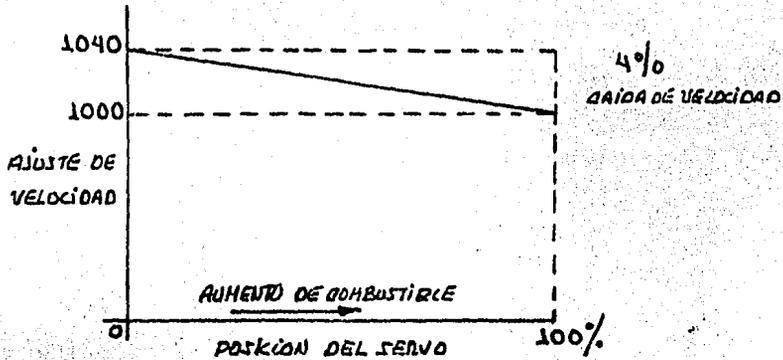


FIG. IV.16

La regulación, sin embargo, depende no sólo del ajuste de la caída de velocidad, sino también del porcentaje de la carrera del servo requerida para mover el acelerador entre las posiciones de vacío y carga promedio. Esto es, el aumento de velocidad resultante de la disminución en la carga - de un valor promedio a cero, expresado como un porcentaje de la velocidad promedio.

La caída de velocidad en un regulador hidráulico no siempre depende de la operación sobre el resorte del sensor de velocidad, como se describió anteriormente. Puede también ser asegurada cambiando la posición de las pesas (y por lo tanto su velocidad para un ajuste dado del resorte) lo necesario para centrar la válvula de control. Esto puede hacerse usando una palanca móvil conectada entre la biela del sensor

de velocidad, el servo y la válvula piloto (FIG. IV.17) o teniendo una abrazadera móvil, operada por el servo (FIG. IV.18).

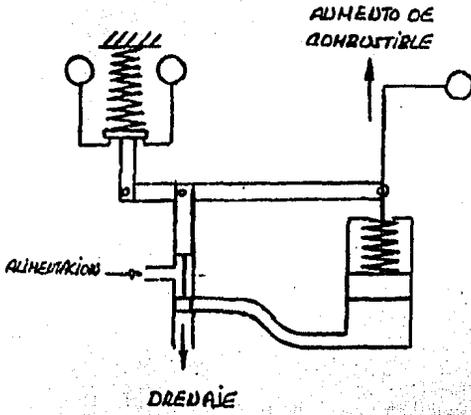


FIG. IV.17

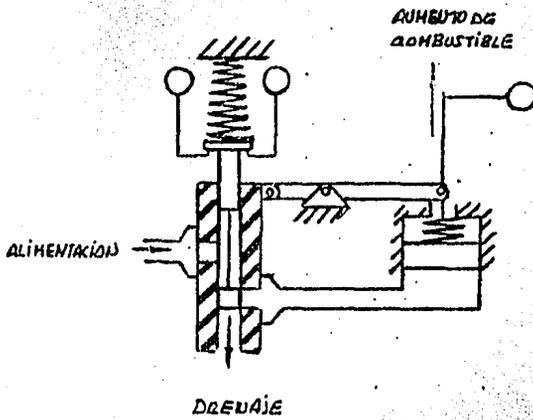


FIG. IV.18

IV.2.2.- REGULADOR ISOCRONO

Algunas veces es deseable tener un primotor aislado funcionando isócronamente, (opera a velocidad constante sin importar el aumento de carga, dentro de la capacidad del primotor), o tal vez la regulación admisible no es suficiente para proveer estabilidad. En tales casos, recurrimos a la caída transitoria, o, como se le llama generalmente, COMPENSACION. Esto viene al caso, debido a la introducción de un reajuste temporal al regulador de velocidad por medio de un movimiento del servo para producir estabilización en la característica de la caída de velocidad, seguida por un retorno relativamente lento del ajuste de velocidad a su valor original.

Esto puede ser realizado de varias formas. Hoy en día los reguladores usan una amplia variedad de esquemas, tal vez el más común (FIG. IV.19), lleva una palanca móvil conectada a la biela del sensor de velocidad, a la válvula piloto y a un pistón receptor, el cual es impulsado por un resorte hasta una posición de equilibrio.

Tan pronto como el pistón receptor está en equilibrio, el centrado de la válvula requiere que las pesas estén siempre en la misma posición. Para un ajuste fijo del sensor de velocidad, esto significa que las pesas deben, para el equilibrio final, estar girando siempre a la misma velocidad. El pistón receptor es desplazado de su posición de -

equilibrio por un flujo de aceite iniciado por el movimiento de un pistón transmisor, el cual se mueve con el acelerador por la acción del servo. Entonces, si no hubo fugas de este sistema hidráulico de compensación el pistón receptor se moverá como si estuviera conectado al servo, y se tendrá una permanente caída de velocidad como se describió anteriormente, siendo insuficiente el resorte de centrado. Sin embargo, si se adiciona una fuga ajustable en la forma de una válvula de aguja, entre el sistema hidráulico de compensación y un carter de aceite, el resorte de centrado permite regresar al pistón receptor lentamente a su posición inicial, después de forzar hacia afuera el aceite suficiente, a través de la válvula de aguja; cuando esto ocurre, el ajuste de velocidad del regulador regresa lentamente a su valor original, aunque el servo y el acelerador permanecen en la nueva posición.

Tal regulador es isócrono, aunque está previsto de la caída transitoria necesaria para tener estabilidad.

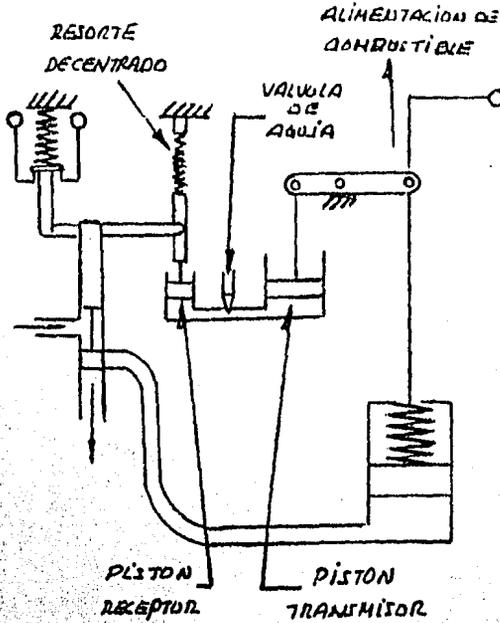


FIG. IV.19

Otro método de producir el mismo resultado, implica la aplicación directa (FIG. IV.20) de presión al émbolo de la válvula piloto, aumentando o disminuyendo la fuerza del sensor de velocidad para efectuar un cambio en el ajuste de velocidad. En la aplicación de este método el aceite que acciona el servo necesita mover un pistón "amortiguador" contra un resorte, lo cual produce una diferencia de presión a través de un pistón receptor rígidamente unido al émbolo de la válvula piloto. Una válvula de aguja permite la igualación de presión a través del pistón receptor de la válvula piloto, para restaurar el ajuste inicial de velocidad.

En operación, como el aceite fluye al servo, el pistón amor-

tiguador es movido contra la fuerza del resorte, dando por resultado una gran presión en el lado bajo del pistón receptor, lo cual produce una fuerza ascendente en la válvula piloto. Esto disminuye la fuerza con la cual los pesos deben balancearse, resultando el centrado de la válvula piloto a una velocidad muy lenta, como una caída de velocidad. Cuando el aceite desplazado se le permite escaparse a través de la válvula de aguja, el pistón amortiguador regresa a su posición de equilibrio, la diferencia de presión desaparece y el ajuste de velocidad regresa a su valor original. Este método, a pesar de que requiere de una válvula piloto más cara, tiene algunas ventajas de operación, una de las cuales es que el retorno exacto del pistón amortiguador al centro, no es esencial para el retorno exacto del sistema a la velocidad normal; la igualación de presión es lo único que se requiere.

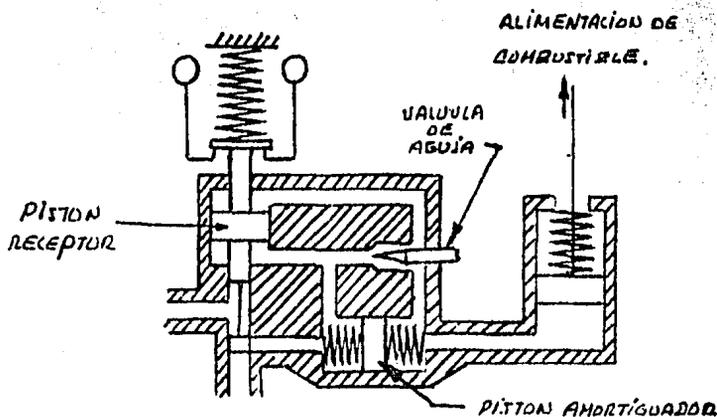


FIG. IV.20

Obviamente es posible combinar la caída temporal y la permanente en un solo regulador, (FIG. IV.21) y esto es hecho en muchas unidades standard, donde la operación en paralelo requiere de una anticipada división de carga, apropiada.

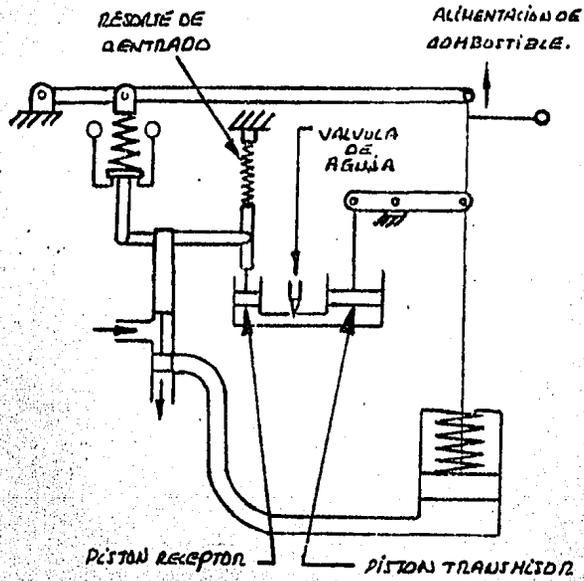


FIG. IV.21

IV.3.- FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL REGULADOR DE VELOCIDAD

Para obtener la función de transferencia del regulador de velocidad, lo representamos por medio de tres ejes unidos por una barra móvil, tal como se ve en la siguiente figura:

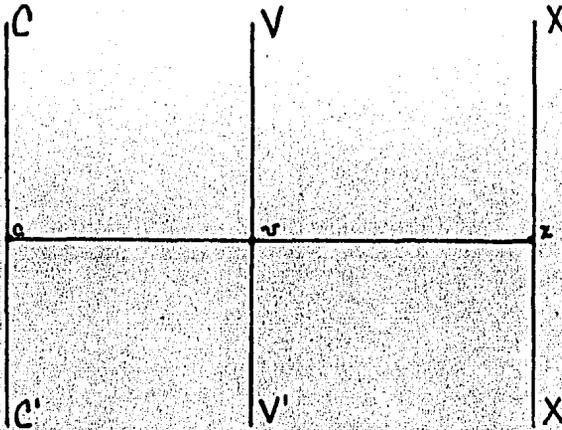


FIG. IV.22

donde:

$\overline{CC'}$ = eje del sensor de velocidad

$\overline{VV'}$ = eje de la válvula piloto

$\overline{XX'}$ = eje del servomotor

El desplazamiento del punto "c" es proporcional al cambio de velocidad (frecuencia); el de "v", al desplazamiento de la válvula piloto; y el de "x" al cambio de potencia generada (acción del servomotor).

$$\Delta C \approx \Delta F$$

1.

$$\Delta X \approx \Delta P_G$$

2.

Cuando la barra móvil esta horizontal, la unidad opera con la potencia media a frecuencia nominal (60 Hz). Además en -- cualquier estado estable del regulador, el punto "v" se encuentra en la posición inicial.

Al haber un aumento de carga comienza a decrecer la frecuencia, entonces el punto "c" cambia a la posición "c' ", al mismo tiempo el punto "v" se mueve a "v' ", por lo tanto la posición de los ejes y la barra móvil es la siguiente:

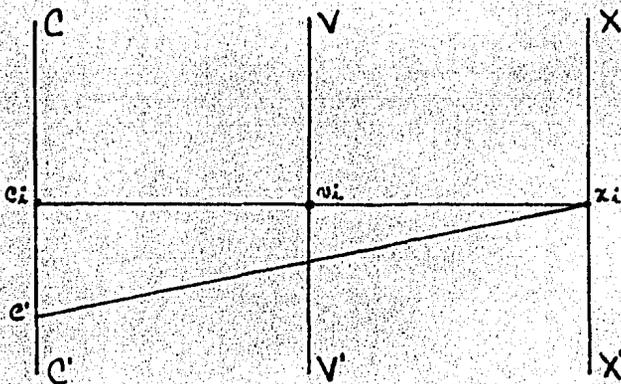


FIG. IV. 23

Debido al desplazamiento de la válvula piloto se acciona el servomotor, por medio del cual se aumenta la generación; entonces, el punto "x_i" se desplaza a "X₁" (FIG. IV.24).

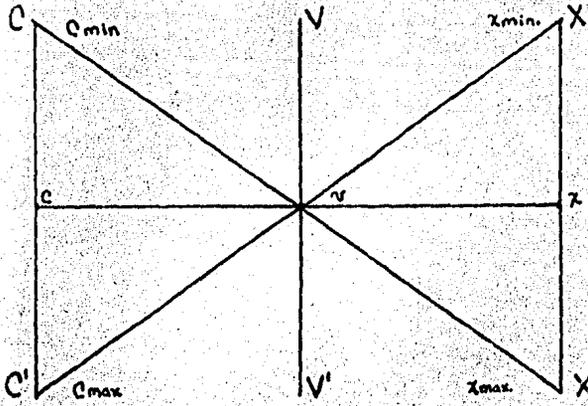


FIG. IV.25

Sabemos que:

$\Delta\chi \approx \Delta P$ En estado estable 3.

$\Delta C \approx \Delta F$ En cualquier momento 4.

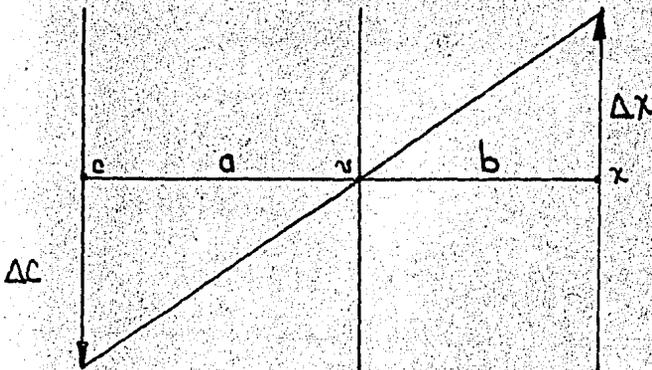


FIG. IV.26

De la figura anterior se observa:

$$\frac{\Delta \chi}{\Delta c} = \frac{b}{a} \quad 5.$$

Además:

$$\frac{\Delta \chi}{\Delta c} = \frac{\Delta P}{\Delta F} = N_G \text{ [Mw/Hz]} \quad 6.$$

La función de transferencia del regulador de velocidad, en función del tiempo es:

$$F. T. = \frac{\Delta \chi(t)}{\Delta c(t)} \quad 7.$$

donde:

$\Delta \chi(t)$ = SALIDA DEL REGULADOR

$\Delta c(t)$ = ENTRADA DEL REGULADOR

Analizando el funcionamiento del regulador (FIG. IV.24), se tiene:

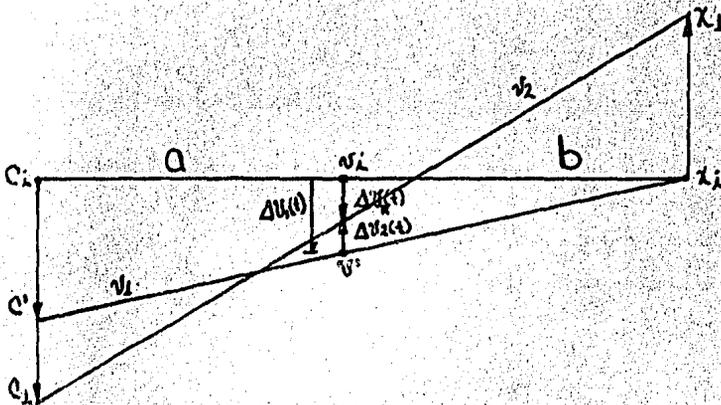


FIG. IV.27

Del diagrama se observa que:

$$\Delta v_2(t) = \Delta v_1(t) - \Delta v_2(t) \quad 8.$$

donde:

$\Delta v_1(t)$ = Acción de la válvula piloto causada por el cambio de velocidad ($\Delta c(t)$).

$\Delta v_2(t)$ = Desplazamiento de la válvula piloto después de ser accionado el servomotor ($\Delta x(t)$).

$\Delta v_2(t)$ = Desplazamiento resultante de la válvula piloto.

Por lo tanto:

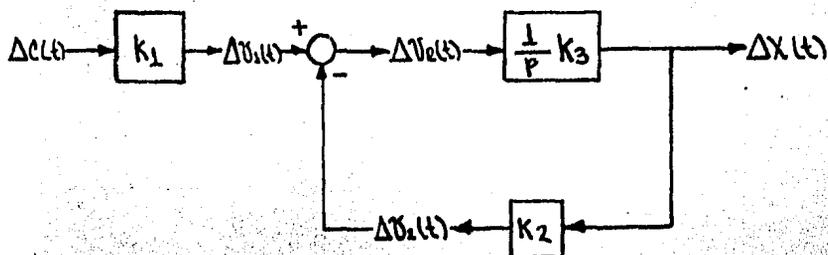
$$\Delta v_1(t) \approx \Delta c(t) \Rightarrow \Delta v_1(t) = K_1 \Delta c(t) \quad 9.$$

$$\Delta v_2(t) \approx \Delta x(t) \Rightarrow \Delta v_2(t) = K_2 \Delta x(t) \quad 10.$$

La acción del servomotor depende de la abertura de la válvula piloto y del tiempo que este abierta, o sea, que el desplazamiento del servomotor es la integral en el tiempo del movimiento total de la válvula piloto, entonces:

$$\Delta x(t) \approx \frac{1}{p} \Delta v_2(t) \Rightarrow \Delta x(t) = \frac{1}{p} K_2 \Delta v_2(t) \quad 11.$$

Entonces, construyendo el diagrama de bloques que relaciona la entrada y la salida del regulador.



De las ecuaciones 8., 9., 10. y 11.:

$$\Delta x(t) = \frac{1}{p} k_3 \Delta v_2(t) = \frac{1}{p} k_3 [\Delta v_1(t) - \Delta v_2(t)] \quad 12.$$

$$\Delta x(t) = \frac{1}{p} k_3 [k_1 \Delta c(t) - k_2 \Delta x(t)] \quad 13.$$

$$p \Delta x(t) = k_3 k_1 \Delta c(t) - k_3 k_2 \Delta x(t) \quad 14.$$

$$\Delta x(t) [p + k_3 k_2] = k_3 k_1 \Delta c(t) \quad 15.$$

$$\frac{\Delta x(t)}{\Delta c(t)} = \frac{k_3 k_1}{p + k_3 k_2} \quad 16.$$

Que es la función de transferencia del regulador en el dominio del tiempo; y en el dominio de la frecuencia, será:

$$F.T.(s) = \frac{\Delta X(s)}{\Delta C(s)} = \frac{k_3 k_1}{s + k_3 k_2} = k_3 k_1 \left[\frac{1}{s + k_3 k_2} \right] \quad 17.$$

Si tenemos una función de la forma:

$$F(s) = \frac{1}{s + \alpha} \quad 18.$$

Su constante de tiempo es:

$$\tau = \frac{1}{\alpha} \quad 19.$$

Por lo tanto, la constante de tiempo del regulador " τ_R ":

$$\tau_R = \frac{1}{k_3 k_2} \quad 20.$$

Multiplicando y dividiendo " τ_R " por la función de transferencia, se tendrá:

$$F.T.(s) = \frac{\Delta X(s)}{\Delta C(s)} = \frac{k_3 k_1 / k_3 k_2}{(s + k_3 k_2) / k_3 k_2} \quad 21.$$

$$F.T.(s) = \frac{\Delta X(s)}{\Delta C(s)} = \frac{k_1}{k_2} \frac{1}{\tau_R s + 1} \quad 22.$$

NOTA:

Según Laplace, el valor de una función en estado estable se tiene cuando " $s=0$ ", por lo tanto para la función del regulador:

$$F.T.(s) \Big|_{s=0} = \frac{\Delta X}{\Delta C} = \frac{k_1}{k_2} \quad 23.$$

De la ecuación 5. y 6.:

$$\frac{\Delta X}{\Delta C} = \frac{k_1}{k_2} = \frac{b}{a} = N_G \text{ [p.u.]} \quad 24.$$

Se observa que en estado estable la función de transferencia del regulador, esta representada por su característica de generación " N_G ". Además, es importante notar, que dicha función depende del diseño del regulador de velocidad.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- FITZGERALD, KINGSLEY AND UMANS.
"Electric Machinery, 4th Ed."
- 2.- CISNEROS CHAVEZ, SALVADOR.
Apuntes del seminario "Sistemas eléctricos de potencia".
- 3.- WOODWARD.
"The control of prime mover speed".
- 4.- STEVENSON, WILLIAM D.
"Análisis de sistemas eléctricos de potencia".
Mc GRAW HILL.
- 5.- SISKIND, CHARLES S.
"Electrical Machines".
Mc. Graw Hill-Kogakusha
- 6.- VIQUEIRA LANDA, JACINTO.
"Redes Eléctricas"
Tercera parte.
Representaciones y servicios de Ingeniería, S.A.
- 7.- ENCICLOPEDIA CEAC.
- 8.- ENRIQUEZ HARPER, GILBERTO.
"Fundamentos de Instalaciones eléctricas".
Lumusa.
- 9.- LUCA MARIN, CARLOS
"Líneas e Instalaciones Eléctricas".
Representación y servicios de Ingeniería, S.A.