

CONTROL ESTÁTICO DE LA GENERACION DE POTENCIA ACTIVA (Provisorio)

I- INTRODUCCION

Es ampliamente reconocida la importante contribución que realizan los controles automáticos para mejorar la confiabilidad y la economía de los Sistemas Eléctricos de Potencia, SEP. En las modernas usinas generadoras se usan extensivamente equipos de control para regular muchos de los parámetros que se relacionan con la conversión y uso de la energía eléctrica. Lo que se desea controlar es la frecuencia y las tensiones en las barras del SEP, siendo que la potencia generada debe minimizar los costos de operación.

Un Generador G puede trabajar individualmente con la carga, o en paralelo con otros Generadores, Gs, de la red. En este último caso, el Generador i, G_i, suministrará su potencia total S_{Gi}:

$$S_{Gi} = P_{Gi} + jxQ_{Gi} \tag{1-1}$$

P_{Gi} = Potencia Activa generada por el G_i

Q_{Gi} = Potencia Reactiva generada por el G_i

al sistema, através de una barra de generación i, que tendrá una tensión compleja de barra de módulo |V_i| y ángulo δ_i. El SEP está funcionando sincrónicamente a la frecuencia f (FIG.1):

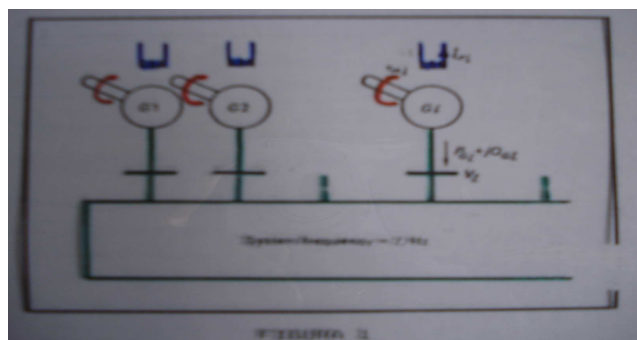
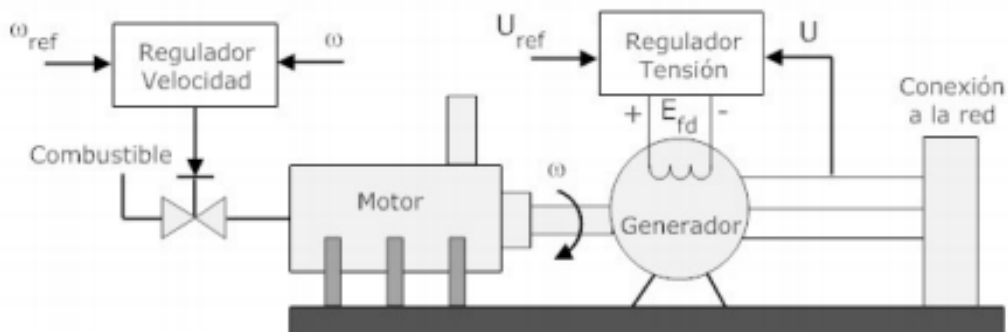


FIGURA 1

Cada máquina puede controlarse por medio de dos entradas: la corriente del rotor o polo del G_i, i_{ri}; y el torque mecánico de la máquina motriz i, τ_{mi}. Cuando estos valores varían, lo hacen también:

$$P_{Gi}, Q_{Gi}, |V_i| \text{ y } f$$

En la terminología de control se puede decir que se tiene una planta G_i con dos entradas y cuatro salidas (FIG.2):



FIGURA 2

Desde el punto de vista del sistema, se desea tener un control no interactivo, es decir, que la variación de una entrada sólo haga variar una salida. Pero generalmente esto no se consigue debido al comportamiento físico inherente del G , el que siempre tendrá acoplamiento cruzado entre las entradas y las salidas. El grado de acoplamiento cruzado depende, sobre todo, del tamaño y la estructura del SEP. Cuando el SEP es muy grande, el acoplamiento es pequeño, ya que representa un momento de inercia muy grande comparado con el momento de un G individual. Es así que una variación del τ_{mi} tiene muy poca influencia en la f del sistema, y una variación de i_{ri} muy poca influencia en la $|V_i|$, porque el sistema, desde el punto de vista del G_i , representa una fuente de impedancia cero. Esto lleva a la siguiente conclusión: la f y la $|V_i|$ no pueden ser controladas desde un G_i , si éste está conectado a un sistema de barra infinita, obteniéndose como consecuencia sólo dos salidas (FIG. 3).



FIGURA 3

En este caso, las condiciones de interacción estarán dadas principalmente por:

$$\Delta i_{ri} \rightarrow \Delta Q_{Gi} \text{ y } \Delta \tau_{mi} \rightarrow \Delta P_{Gi}$$

En menor importancia:

$$\Delta \tau_{mi} \rightarrow \Delta Q_{Gi}$$

donde Δ significa variación.

OBS.: Si se tiene sólo un G que alimenta una carga, y se aumenta el $\tau_m \Rightarrow$ que se incrementa la velocidad $n \Rightarrow$ aumenta la $f \Rightarrow$ aumenta la fem \Rightarrow aumenta la tensión en la barra \Rightarrow que hay variación de P_G y Q_G . En resumen, a una $\Delta \tau_m$ existen Δ en las cuatro salidas.

II - ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE CONTROL

Cuando la demanda original total, formada por las demandas activas y reactivas P_D^o y Q_D^o y representada por el vector d^o , se desvía de este valor en una cantidad impredecible y pequeña Δd , el estado inicial del sistema, representado por el vector x^o , dado por el módulo y ángulo de la tensión de barra, cambiará en una cantidad Δx , por lo tanto el control deberá detectar estos cambios e iniciar en tiempo real cambios en el control de potencia, representado por el vector Δu , formado por las potencias activas y reactivas generadas, para eliminar en el menor tiempo posible las Δx (FIG. 4):

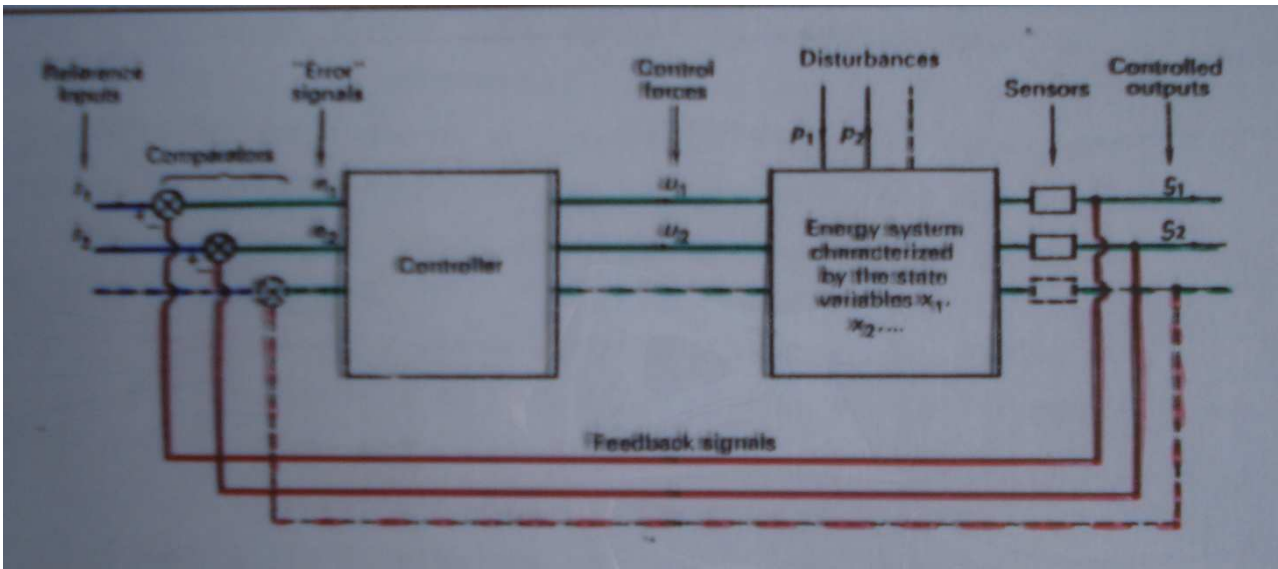


FIGURA 4

$$d^T = [d_1, \dots, d_i, \dots, d_n] = [P_{D1}, Q_{D1}, \dots, P_{Di}, Q_{Di}, \dots, P_{Dn}, Q_{Dn}] \quad (2-2)$$

$$x^T = [x_1, \dots, x_i, \dots, x_n] = [\delta_1, |V_1|, \dots, \delta_i, |V_i|, \dots, \delta_n, |V_n|] \quad (2-3)$$

$$u^T = [u_1, \dots, u_i, \dots, u_n] = [P_{G1}, Q_{G1}, \dots, P_{Gi}, Q_{Gi}, \dots, P_{Gn}, Q_{Gn}] \quad (2-4)$$

Se comparan las salidas s_i ($f, |V_i|$) con las referencias de entradas ($r_i, |V_i|_i$), obteniéndose las señales de error e_i , que luego de pasar por el controlador se transformarán en señales u_i , que actuarán sobre el sistema para llevarlo al estado deseado. Este control tratará de eliminar las perturbaciones que dieron origen a su accionar. Cuando las referencias son constantes, $r_i = r_i^o$, el sistema se llama Regulador.

El análisis realizado es del tipo incremental:

$$e_i = r_i - s_i = r_i^o - (s_i^o - \Delta s_i) = -\Delta s_i = error$$

Como el sistema de control es múltiple entrada-salida, entonces el mayor problema será el diseño del controlador. Dicho problema está relacionado con el grado de acoplamiento de las variables de entrada. Si se realiza un estudio del comportamiento dinámico del sistema el modelo estará representado por ecuaciones diferenciales, en lugar de las ecuaciones algebraicas que representan un análisis estático.

Existen tres importantes características que permiten simplificar el modelo matemático del sistema:

1. El grado de desacople entre los canales de control "carga-f" y "tensión"
2. El grado de desacople entre los canales de control de tensión de las barras individuales.
3. La "coherencia" del ángulo de fase dinámico δ , que existe entre grupos de barras del sistema, cuando se produce una perturbación en el sistema

COHERENCIA o SINCRONISMO: "Generalmente las perturbaciones de f (velocidades rotóricas) en las n barras, son todas de diferentes magnitudes. Sin embargo si dos o más barras tienen igual diferencia de f , Δf , entonces ellas oscilarán sincrónicamente o coherentemente".

III - CONTROL " $P_{Gi} - f$ " y " $Q_{Gi} - |V|$ "

Si se realiza un análisis de sensibilidad estático, se llega a las siguientes conclusiones:

1. Cambios estáticos de potencia activa inyectada en la barra i del sistema, ΔP_i , afectará esencialmente el δ_i de la barra \Rightarrow afectará la potencia activa transmitida por las líneas; y no habrá cambios notables en la $|V_i|$ de la barra $i \Rightarrow$ el flujo de potencia reactiva permanecerá casi constante.
2. Cambios estáticos de potencia reactiva inyectada en la barra i , ΔQ_i , afectará esencialmente el $|V_i|$ de la barra \Rightarrow afectará la potencia reactiva transmitida por las líneas; y no habrá cambios notables en el δ_i de la barra $i \Rightarrow$ el flujo de potencia activa permanecerá casi constante.
3. Cambios estáticos de potencia reactiva inyectada en la barra i , ΔQ_i , afectará fuertemente el $|V_i|$ y en menor grado los $|V_j|$, con $i \neq j$.

Estas propiedades se aplican cuando:

- Se tienen cambios estáticos en las barras del sistema.
- La carga de las líneas está bien por debajo del límite estático de las líneas.
- Las desviaciones con respecto a la referencia son pequeñas.

Con estas suposiciones se puede formar un modelo del sistema, dividido en dos canales de control (FIG. 5):

- Control de $P_{Gi} - f$ - Control de $Q_{Gi} - |V_i|$

III-1 Control del Canal " $P_{Gi} - f$ "

Se considera el problema de controlar la potencia activa generada P_{Gi} en un área prescrita, en respuesta a cambios en la f del sistema y a cambios en la potencia de intercambio, de tal manera que se deba mantener constante la f del sistema, y la potencia de intercambio P_{tie} establecido con las otras áreas (FIG. 5a Y 5b). El término "control automático de carga-frecuencia" es frecuentemente usado para identificar este tipo de control.

Básicamente el problema es mantener el delicado balance entre la potencia activa generada total, P_{GT} y la potencia activa consumida o de demanda total, P_{DT} , siendo la f del sistema la indicadora que este balance se está efectuando.

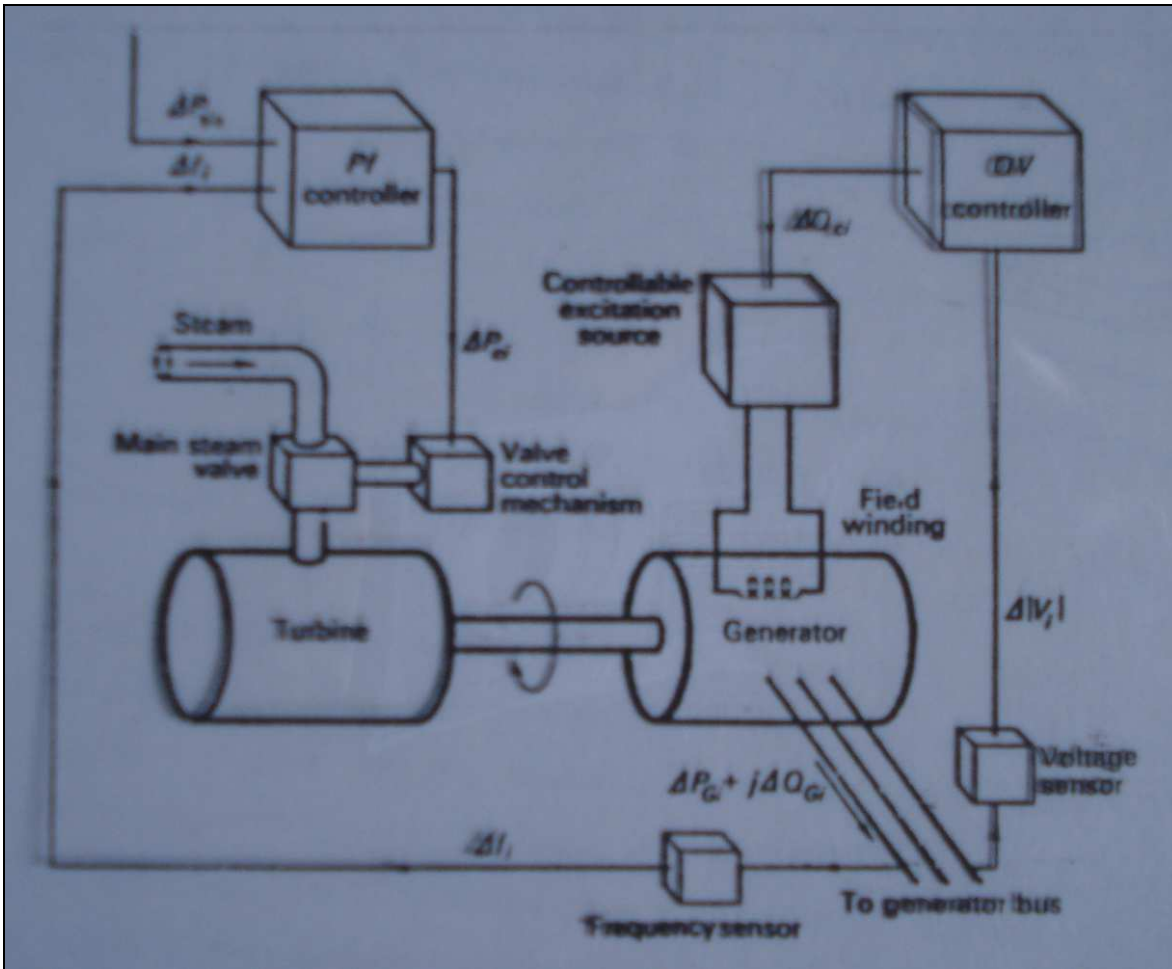


FIGURA 5a

El objetivo de este canal es ejercer el control de la f y simultáneamente del intercambio de potencia activa que se realiza vía líneas de interconexión, IT. Se sensa el error de f , Δf , y los incrementos de la potencia real de intercambio, ΔP_{tie} , que indirectamente darán información acerca del error incremental de estado, ΔX_i .

Esta información es amplificada, mezclada y transformada en señales de comando de potencia activa, ΔP_{Gi} , que se envía al mecanismo de alimentación de combustible. Como resultado de esta acción, se consigue un cambio en la generación de potencia activa, ΔP_{Gi} , que modificará el estado del sistema x (definición (2-3)), que desencadenó la acción del regulador. El tipo de control cuando se considera intercambio, será estudiado en el punto.

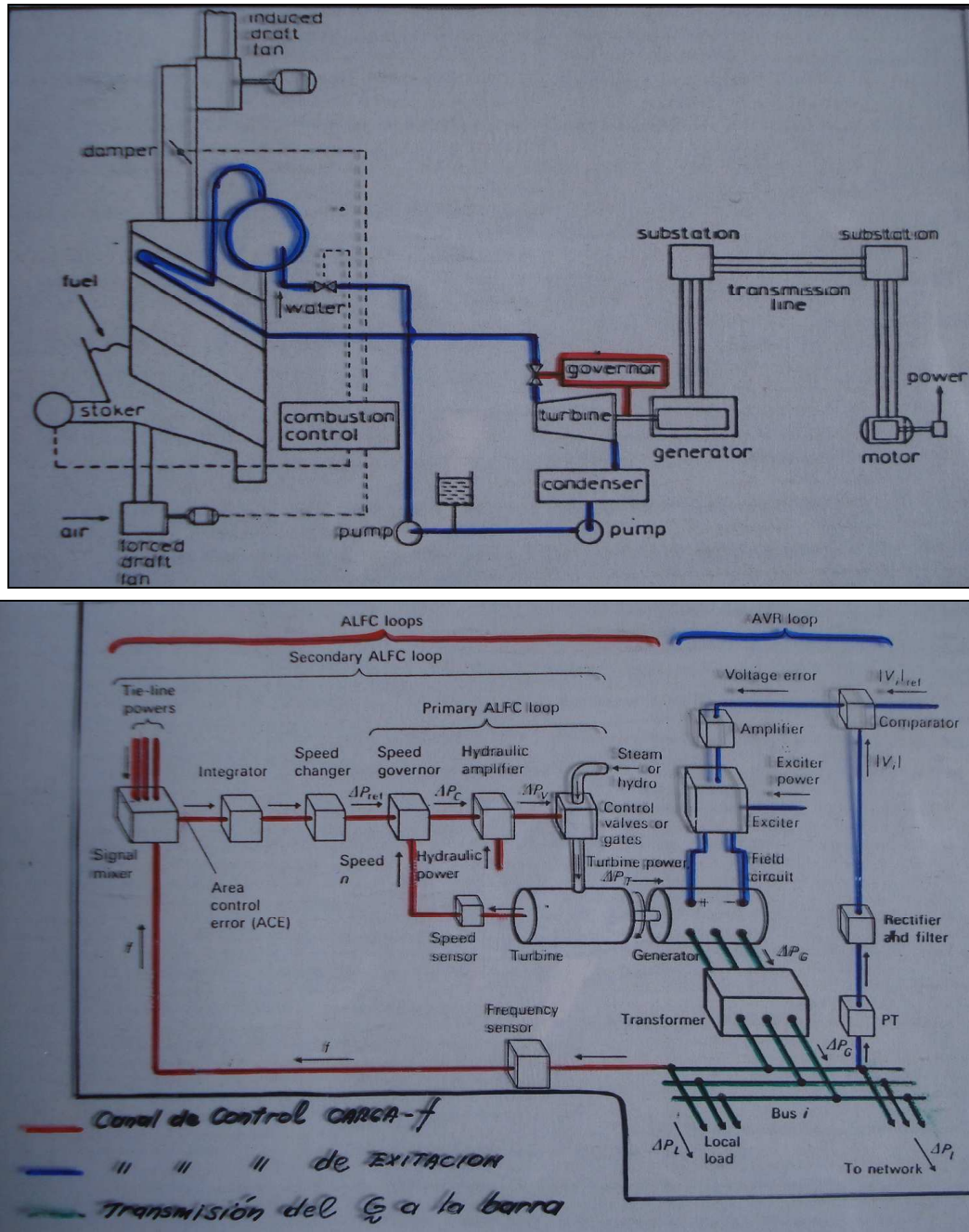


FIGURA 5b

Observaciones: Existen tres razones básicas para mantener la frecuencia f del sistema entre determinados límites:

- La mayoría de los motores eléctricos tienen velocidades proporcionales a la f .
- Existe un gran número de relojes eléctricos, cuyas exactitudes no tan sólo son fn . del error de la f , sino de la integral de la f .
- La operación total del sistema puede ser mejor controlada, si se mantiene el error de f entre ciertos límites.

La razón no es tan restrictiva ya que la mayoría de los motores no son tan sensibles a f de 50 ± 2 Hz. Las razones 2 y 3 son importantes, ya que desviaciones inusuales de la f indicarán que algo "raro" está pasando. En los modernos sistemas eléctricos de potencia, la f es mantenida normalmente entre ± 0.05 Hz.

III- 2. CONTROL DEL CANAL " $Q_{Gi} - |V_i|$ "

El objetivo de este canal es controlar la Potencia Reactiva generada Q_{Gi} en respuesta a cambios en el módulo de tensión de la barra i , $\Delta|V_i|$ (FIG. 5a y b). El error del módulo de tensión, $\Delta|V_i|$, es sentido, y la señal es convertida en un comando de potencia reactiva, ΔQ_{Gi} , que alimenta la fuente de excitación. El resultado es un cambio de la corriente de campo, y así de la fem del generador, que producirá una variación de potencia reactiva generada, ΔQ_{Gi} , que tratará de anular la variación de estado que llevó al controlador a actuar.

Un desequilibrio entre la potencia reactiva generada y la potencia reactiva consumida, dará lugar a variaciones de módulos de tensiones en las barras del sistema. Un análisis de sensibilidad muestra que la desviación de $|V|$ será mucho mayor en la barra donde se produce el desequilibrio reactivo, que en las barras vecinas.

El despacho de Q se hace tratando de minimizar las pérdidas en la línea. Durante las horas de poca demanda de potencia activa, P_D , la demanda de potencia reactiva, Q_D , también se reduce. Si se tienen líneas largas de transmisión, se puede encontrar que la generación capacitiva es de tal magnitud que se tiene un exceso de potencia reactiva.

Para solucionar este problema, se puede desexcitar los generadores para que absorban esta potencia reactiva, sin embargo si se realiza esto, la fem del generador disminuye, reduciendo el margen de estabilidad del sistema. Por lo tanto se puede estar forzado a instalar reactores shunt que consumirán este exceso.

La estrategia de control frecuentemente usada, consta de los siguientes puntos:

1. Cada barra de generación tiene su control de tensión.
2. El perfil de tensión del sistema es preseleccionado sobre la base del estudio de flujo de potencia.
3. El perfil de tensión es cambiado periódicamente para tener en cuenta la variación de carga.

Un modelo de un sistema de excitación está dado por la FIG. 6:

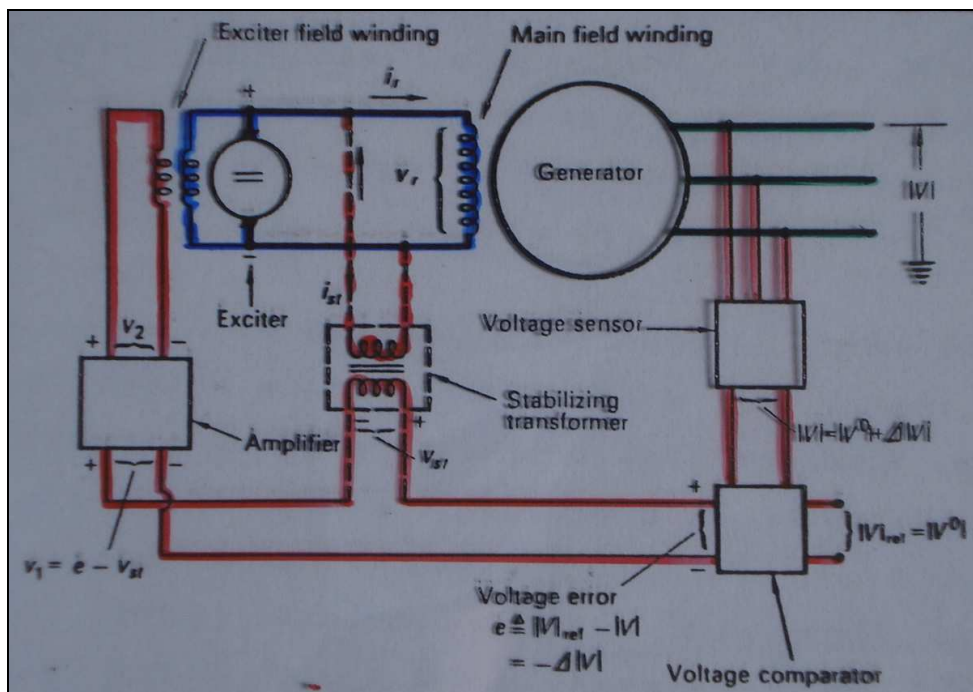


FIGURA 6

La capacidad de regulación de tensión del G acoplado a la red, depende del tamaño de éste comparado con el SEP en cuestión, y del rango admisible de excitación, o en otras palabras, de la capacidad de absorción y suministro de potencia reactiva del G. Frente a un sistema grande, el suministro de excitación no se traduce en un aumento de tensión significativo, sino en un aumento del suministro de potencia reactiva. Frente a un sistema reducido, un aumento de excitación se traduce inmediatamente en un aumento de tensión (ver la relación que existe entre este fenómeno y el producido en el canal "f - P_G").

Existen diversos mecanismos para regular la tensión. Algunos de ellos son:

1. Regulador Tirriel.
2. Regulación por sectores rodantes.
3. Elementos de electrónica de potencia.

Estos mecanismos de regulación pueden ser estudiados de la referencia bibliográfica [4].

IV - REGULACION PROPIA, PRIMARIA y SECUNDARIA

Para el control estático de la generación de potencia activa de un SEP, se recurre a la regulación primaria y secundaria, teniendo en cuenta además que el sistema tiene de por sí su propia autoregulación. Todos estos mecanismos se combinan para dar como resultado un valor de regulación equivalente.

IV-1 Autoregulación o Regulación Propia de un SEP

Antes de entrar en el tema concreto de la autoregulación de un SEP, se establecerá una analogía entre ésta y el autonivelamiento de un depósito de agua.

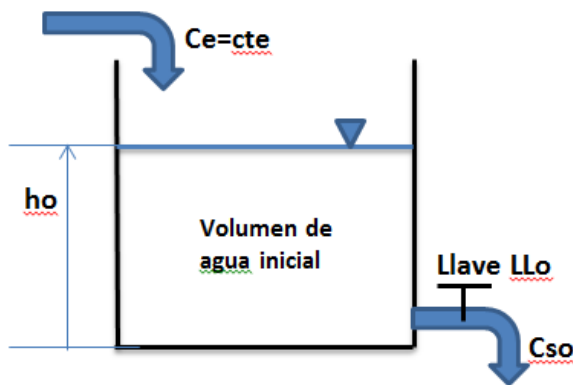


FIGURA 7a

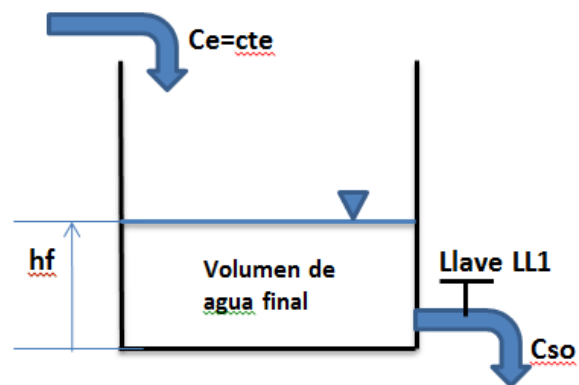


FIGURA 7b

Suponer que inicialmente el sistema de la FIG. 7a está en equilibrio, y se quiere aumentar el caudal de salida C_{so} mediante la apertura de la llave LL, manteniéndose cte. el caudal de entrada $C_e \Rightarrow$ al comienzo hay un aumento del C_s , pero inmediatamente el nivel inicial de agua h^0 comenzará a disminuir debido a que $C_s > C_e$. Como el C_s , es proporcional a la altura h del agua, a medida que h disminuye (el volumen VOL también), disminuirá el C_s . Después de un cierto tiempo es posible que se pueda establecer un nuevo equilibrio, y esto ocurrirá si nuevamente $C_{so} = C_e$ (FIG. 7b). Si se alcanza este nuevo equilibrio será a una altura final $h^f < h^0$ y a costa de haber perdido un cierto volumen de agua (volumen final $V^f < \text{volumen inicial } V^0$). Puede ocurrir que la sección S de salida del líquido (cuando se abre LL) sea tan grande que deje salir todo el contenido \Rightarrow que el sistema no llegará a un equilibrio.

Conclusión: Es posible encontrar nuevamente un equilibrio entre el caudal de entrada y salida sin tocar ninguna variable, pero el nivel al que queda el agua es menor al inicial, en otras palabras, el costo de encontrar el equilibrio es a expensas de haber perdido agua del tanque.

Se puede analizar del mismo modo, que pasaría si ahora se cierra un poco la llave (disminuyendo la sección S), de tal manera que $C_s < C_e$.

Si se pretende retornar a la h^0 , las alternativas son, aumentar el C_e , disminuir la S o una combinación de ambas.

Un SEP está en equilibrio cuando se cumple:

$$\sum_{i=1}^4 P_{Gi} = \sum_{i=1}^4 P_{Di}^0 + \text{Pérdidas}^f \quad (4-5)$$

La variable que me indica que existe este equilibrio, es la constancia de la frecuencia.

Suponer ahora que se aumenta la carga sin modificar la generación, la ecuación (4-5) se transforma en una desigualdad:

$$\sum_{i=1}^4 P_{Gi} \leq \sum_{i=1}^4 P_{Di} + \text{Pérdidas}$$

entonces deja de existir equilibrio entre el par motor PM (dado por el torque de las máquinas motrices que se considera constante), y el par resistente PR (dado por la demanda eléctrica). Por lo tanto:

$$PM < PR \Rightarrow \text{el sistema comienza a ser frenado} \Rightarrow f^f < f^o$$

¿Hasta cuando la f disminuye? Hasta que exista un nuevo equilibrio entre el PM y el PR, o si no hasta que el sistema deje de funcionar. Suponiendo que se llegue a un equilibrio, éste puede suceder en virtud de que la demanda (carga) sea dependiente de la f (la demanda proporcional a la f). A medida que la f disminuye, la energía cinética del sistema E_c disminuye (E_c proporcional a la f^2), por lo tanto si se llega a un equilibrio, éste se dará a una f menor que f^o , teniendo el sistema menor E_c . En otras palabras, una parte de la E_c del sistema se usa para atender el aumento de la demanda, hasta que este aumento de la demanda tienda a cero, en virtud de la variación de la demanda en fn. de la f.

Esto se puede analizar por medio de un ejemplo como el que se observa en la FIG. 8a y b, que representa un SEP de 4 barras que inicialmente está en equilibrio, pero que se desequilibra por el aumento de la demanda ΔP_2 en la barra 2.

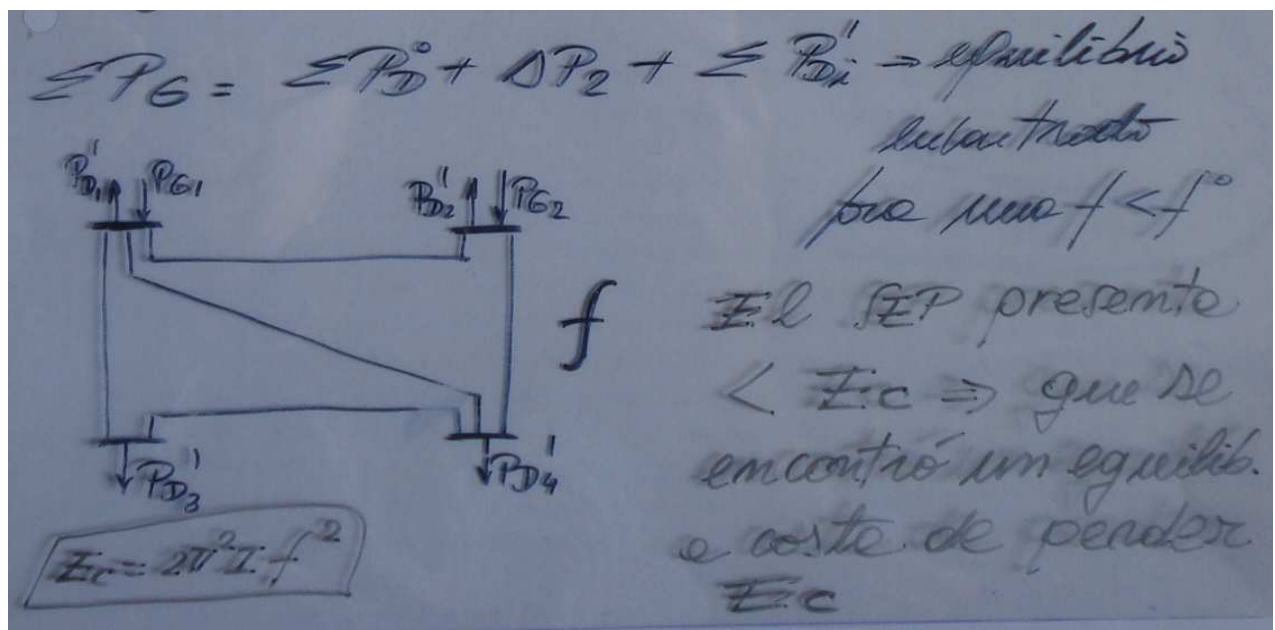
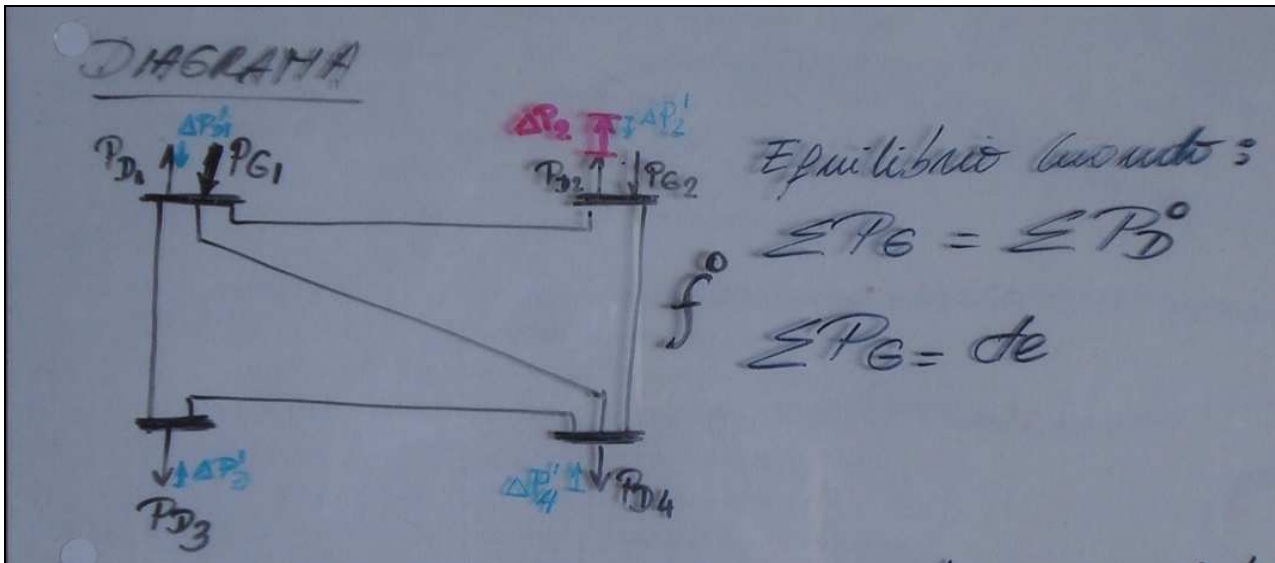


FIGURA 8 a y b

Como la f disminuye en todo el SEP \rightarrow las velocidades de los rotores también \rightarrow los Motores experimentan una disminución de su carga \rightarrow extraen una corriente menor del sistema eléctrico al que están conectados \rightarrow la disminución resultante de todas las cargas ΔP_{Di} del SEP, podría equilibrar el aumento de la carga original ΔP_2 , que dio lugar al desequilibrio inicial \rightarrow

$$\sum_{i=1}^4 P_{Gi} = \sum_{i=1}^4 P_{Di}^f + \text{Pérdidas}^f$$

De esta forma la frecuencia se estabiliza en un valor de $f^f < f^0$

La analogía entre el modelo hidráulico del tanque de agua y el SEP (salvando algunas diferencias), estará dada por la correspondencia de los siguientes parámetros (FIG.9):

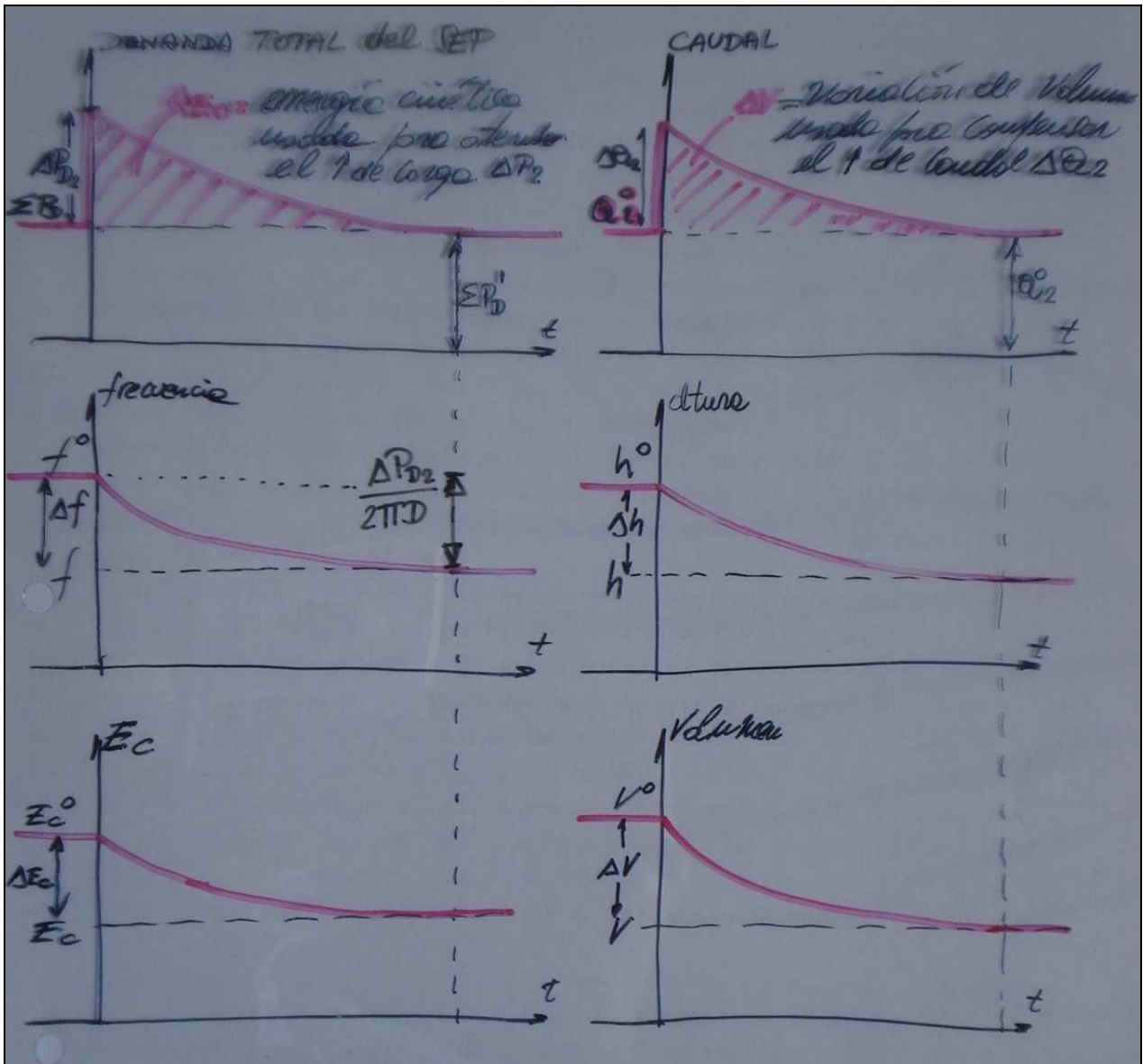


FIGURA 9

Se puede observar que las variaciones de las distintas variables son del tipo exponencial.

Una operación sincrónica de los Gs representa un estado de equilibrio del sistema. En otras palabras, un G que está sincronizado experimenta fuerzas que lo mantienen funcionando a la misma velocidad que el resto de los Gs del sistema. La P_{Gi} se la puede controlar a través del torque de la máquina motriz (apertura o cierre de válvulas de alimentación de combustible), sin embargo la velocidad del G_i estará atada al resto del sistema (cuando la potencia del SEP es mucho más grande que la del G_i).

Si se da un mayor (menor) torque, el ángulo interno de la máquina i , δ_{in} , (ángulo entre el campo giratorio del estator y el eje del polo del rotor, FIG. 10) aumenta (disminuye) \Rightarrow la potencia y corriente generada aumenta (disminuye), y al mismo tiempo esta corriente construye un torque desacelerante (acelerante) en la máquina, que contrarresta exactamente el incremento (disminución) del torque acelerante, llegándose a un nuevo equilibrio luego de algunas oscilaciones. En cada G se tiene este delicado y automático mecanismo de equilibrio. En este equilibrio la $f = cte$.

La máquina sincrónica trabaja como generador (motor), cuando el campo magnético del rotor, H_R , está adelantado (atrasado) al campo magnético del estator, H_E .

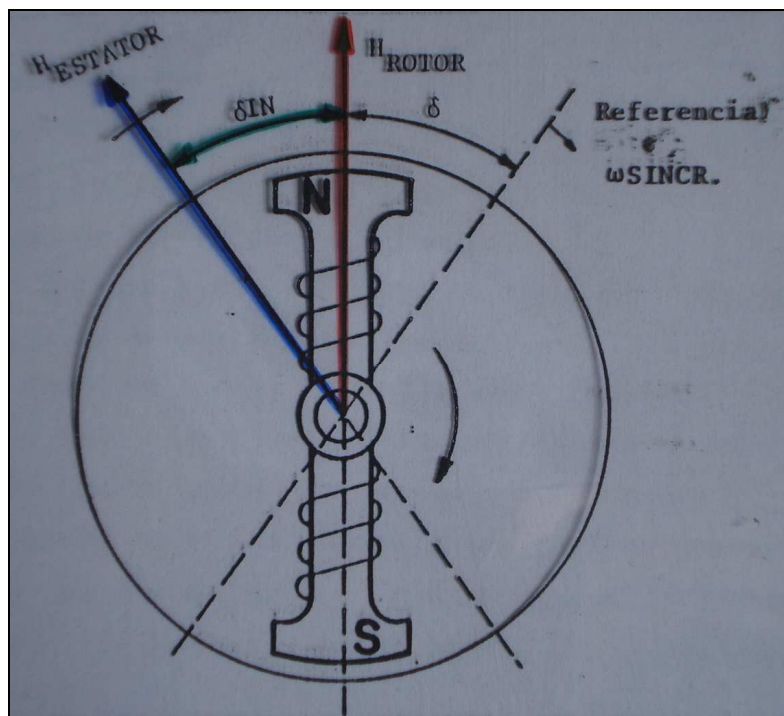


FIGURA 10

Si la demanda y la generación son ctes., entonces el sistema se encuentra en equilibrio. Pero esto no sucede en la práctica ya que la carga varía en fn. del tiempo con un comportamiento aleatorio, por lo tanto es imposible obtener un equilibrio entre la demanda y la generación, con la consecuencia que la f fluctuará constantemente.

Para entender esto, suponer que se tiene un sistema a 50 Hz en estado de equilibrio. Repentinamente hay una disminución de la demanda, las válvulas de alimentación no cambian su posición porque ignoran esta variación (todavía no tienen el mecanismo de regulación) \Rightarrow el torque del motor no cambia. La disminución de la demanda resulta en una baja de la corriente circulante que será distribuida entre todos los G \Rightarrow disminuyen los torques electromecánicos de cada G \Rightarrow cada G experimentará un pequeño torque acelerante \Rightarrow aumenta su velocidad n y frecuencia f. La proporción en el incremento de velocidad, dependerá del momento total de inercia del equipo que está funcionando. Como la carga consta generalmente de muchos motores, estos experimentarán un aumento de su velocidad (porque aumentó la f del sistema) \Rightarrow sentirán un aumento de su carga \Rightarrow deberán extraer mayor corriente de la red. El incremento de carga resultante, posiblemente se equilibrará con el descenso de carga que desató la cadena de sucesos vista, y la f se nivelará en un nuevo valor de frecuencia algo mayor (estudiar la analogía hidráulica correspondiente).

Se eligió este ejemplo para descubrir la estrecha relación que existe entre la demanda y la f.

CONCLUSION: "La f constituye un indicador sensible del balance de energía del sistema, entonces deberá ser usada como información para el equipo de control de velocidad de la máquina motriz del G"

La posibilidad inherente del sistema de alcanzar por su propio medio (sin ningún mecanismo exterior) un nuevo estado de equilibrio, se expresa mediante un parámetro llamado coeficiente de amortiguamiento del sistema, AM, que es una medida del cambio de la carga conectada en función de la frecuencia (FIG.11):

$$AM = \frac{\Delta P_D}{\Delta f} \text{ [MW / 0.1Hz]} \quad AM = \frac{\Delta P_D / P_{ref}}{\Delta f} \text{ [% / 0.1Hz]}$$

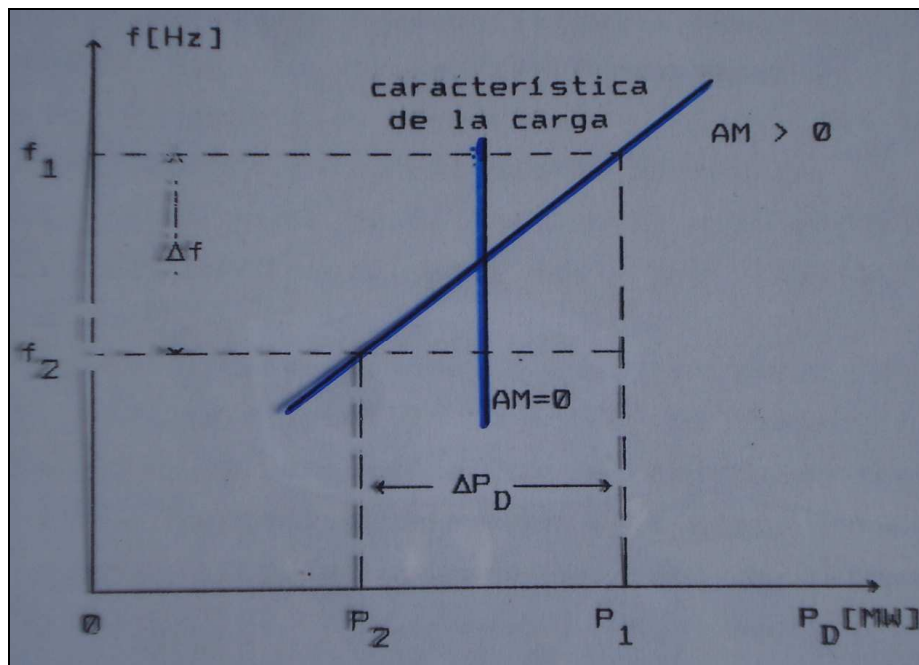


FIGURA 11

Como se ve en la FIG. 11, $AM=0$ corresponde a una línea vertical (se la podría asociar a una carga de tipo resistiva), que indica que a pesar que varíe la frecuencia del sistema, las cargas que están conectadas a la red no variarán su valor. Por otro lado, $AM > 0$ corresponde a una línea con pendiente positiva, que indica que cuando varía la frecuencia, la carga conectada al sistema varía de manera proporcional (cargas compuestas de motores).

En un SEP grande, AM presenta en general valores bajos, del orden de 0.3 a 0.5 [% décima de Hz] tomando como base la potencia de pico o la reserva rotante (referencia [5]). Para ilustrar esto, se plantea el caso que aumente por ejemplo la demanda en el nodo 2 del sistema, por lo que la frecuencia caerá. Como el AM en general es muy bajo, la disminución de toda la carga debido a este descenso de frecuencia será muy bajo, por lo que la frecuencia seguirá bajando. Dado el caso que se llegase a compensar el aumento de la demanda inicial en el nodo 2, lo hará seguramente a una frecuencia tan baja que será inadmisibles para un SEP. Por esta causa se debe actuar sobre las unidades motoras mediante algún mecanismo de regulación.

Ejemplo: Dado un $AM = 0.4$ [%/0.1Hz] del SEP, encontrar el AM en $[MW / 0.1Hz]$ si la potencia rotante del sistema es $P_R = 500$ [MW]

$$AM = (\Delta P_D / P_R) / \Delta f \quad \Delta P_D = 0.4 \text{ [%/0.1Hz]} \times 500 \text{ [MW]} \times 0.1 \text{ [Hz]} = 2 \text{ [MW]}$$

$$AM = 2 \text{ [MW/0.1Hz]}$$

La característica carga-f del regulador astático se muestra en la FIG. 12:

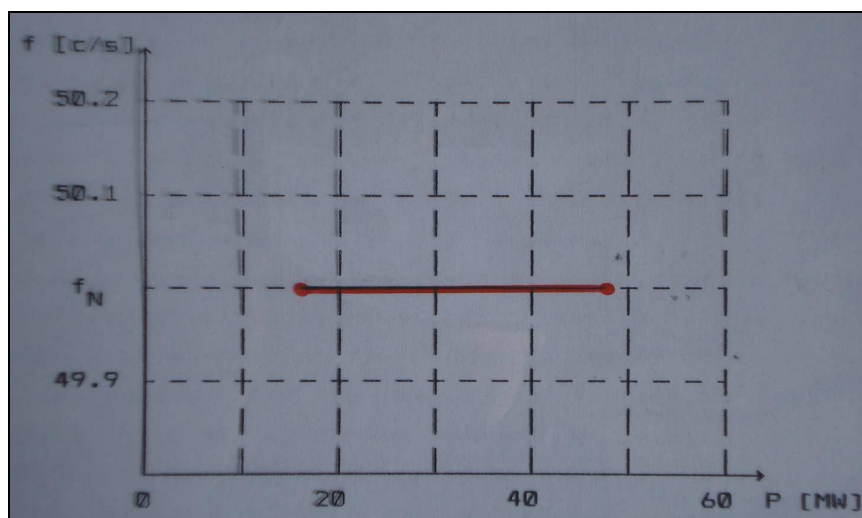


FIGURA 12

Esta característica no puede definir una determinada potencia generada por la unidad i (ya que ésta puede ser $0, \dots, P_j, \dots, P_{\max}$) para la f nominal, de esta manera el funcionamiento se vuelve inestable. Una disminución de la f hará que la potencia sea máxima, un aumento llevará la potencia a un valor mínimo \Rightarrow el estado de equilibrio se logra luego de una serie de oscilaciones resultando una operación poco estable. Además de esto, si se tienen dos o más máquinas trabajando en paralelo, será indeterminada la distribución de carga entre ellas. Lo que ocurre en la práctica es que una de ellas se hará cargo de toda la carga, mientras las otras quedarán como estaban antes de la actuación de sus reguladores (porque los reguladores de cada máquina nunca responden con la misma rapidez ante una perturbación).

El comportamiento del regulador isócrono también llamado astático puede representarse en un par de ejes cartesianos (x =Potencia, y =frecuencia) por medio de una línea horizontal (frecuencia constante en régimen permanente). Funciona correctamente en una red aislada donde exista solo un generador síncrono con este regulador.

Si ahora se analiza un sistema eléctrico de potencia (SEP) donde los generadores trabajan en paralelo y se instalan estos reguladores en diversas máquinas, surge el problema que el funcionamiento del conjunto de estos reguladores se vuelve poco estable y además se indetermina la distribución de carga asociada a cada máquina.

En la práctica sucede que uno de los generadores se hará cargo de la variación de carga ocurrida (la máquina que tenga el regulador más veloz), mientras las otras quedarán como estaban antes de la actuación de sus reguladores.

Por lo tanto en un SEP, donde se requiere que muchos generadores participen de la regulación primaria, el regulador isócrono no es adecuado.

Con el fin de comprender el mecanismo de regulación de frecuencia, consideremos a partir del diagrama de bloques de la figura 5 un sistema de control que cierre el bucle entre error de frecuencia y potencia mecánica mediante un acción integral. Este sistema de control es el representado en la figura 6, donde por simplicidad se han despreciado varias dinámicas intermedias (accionamiento de la válvula de admisión, turbina, etc). Ante un error negativo de la frecuencia, el regulador aumenta la potencia mecánica aplicada sobre el eje, lo cual tiende a reducir el error de frecuencia. El efecto integrador del regulador hace que el régimen permanente se alcance cuando el error de frecuencia es cero.

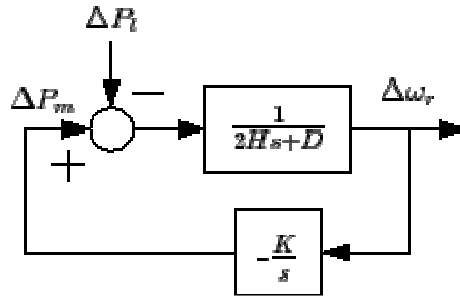


Figura 6: Esquema de un regulador isócrono.

La figura 7 muestra la respuesta temporal del regulador isócrono ante un aumento de la demanda. Inicialmente, la diferencia entre la potencia mecánica P_m y la potencia generada P_e hace que la velocidad de giro comience a decrecer, más o menos rápido según la inercia del rotor. El lazo regulador comienza entonces a incrementar la potencia mecánica, lo que se traduce en una ralentización de la caída de la velocidad. Cuando la potencia mecánica supera la potencia eléctrica, la velocidad comienza a crecer. Finalmente la velocidad de giro coincide con la de referencia y la potencia generada con la potencia demandada.

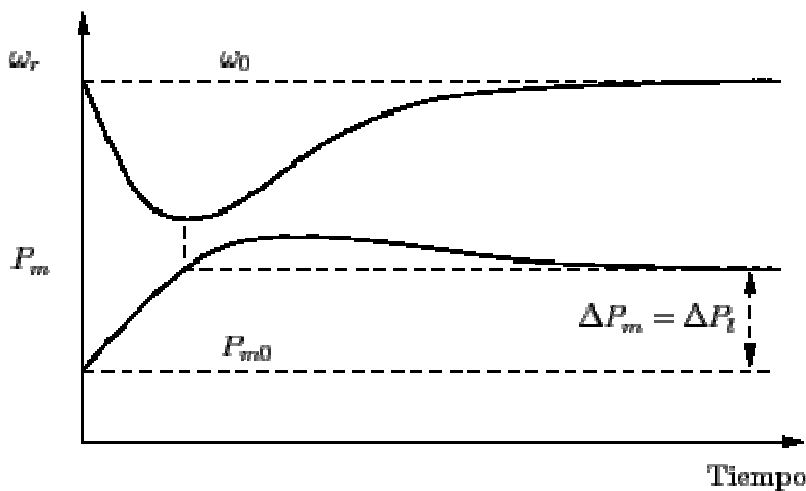


Figura 7: Respuesta de un regulador isócrono ante un escalón de demanda.

Este regulador, conocido como regulador isócrono porque mantiene la f cte en régimen permanente, funcionaría correctamente en un sistema aislado donde existiera un único G síncrono, o bien donde el resto de los Gs no participara en la RPF. Sin embargo, si en un mismo sistema dos Gs ejecutasen este tipo de regulación, ambos competirían entre sí para alcanzar su propia velocidad de referencia, y el comportamiento del sistema sería inestable. Como en un sistema eléctrico es deseable que un elevado número de Gs participen en la regulación primaria, el regulador isócrono no se aplica en la práctica.

IV-2.2. Regulador Estático

Con el fin de contornear los inconvenientes que se presentan con el regulador astático, se construye un regulador con regulación permanente (speed drop). Esto se logra mediante una realimentación de la información de la posición de la válvula de admisión, como se muestra en la FIG. 13. Con esta regulación el equilibrio se establece (cuando varía la carga), para una nueva posición del punto M, o sea para una nueva f .

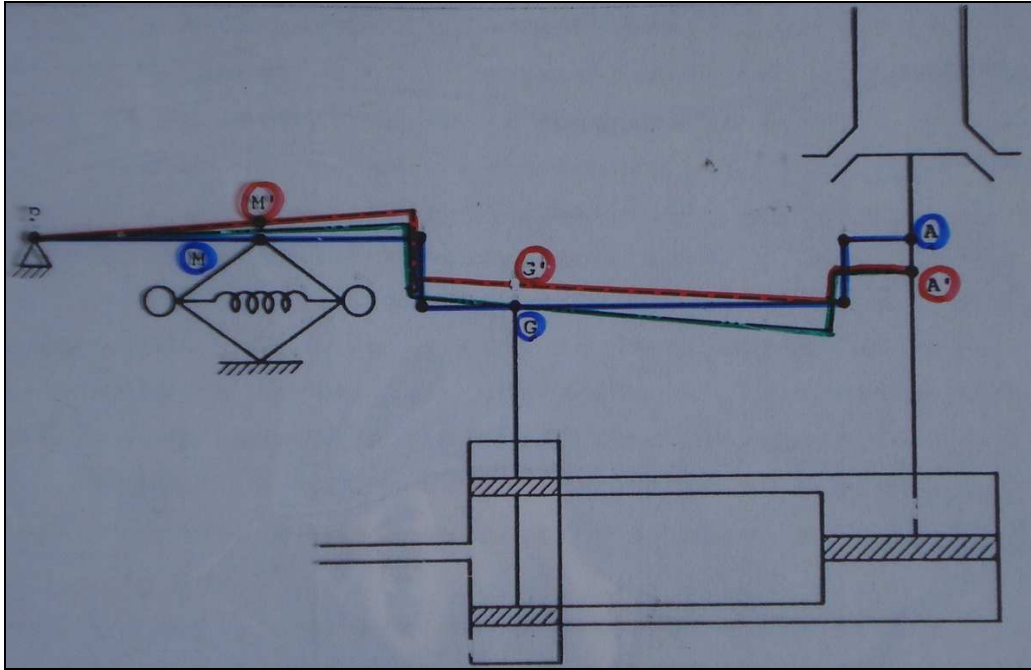


FIGURA 13

La característica carga- f del regulador estático, mostrada en la FIG. 14 es inclinada negativamente \Rightarrow a un aumento de carga hay una disminución de la f , y recíprocamente. La regulación es rápida, y permite distribuir las variaciones de carga entre varias unidades en paralelo en forma conveniente:

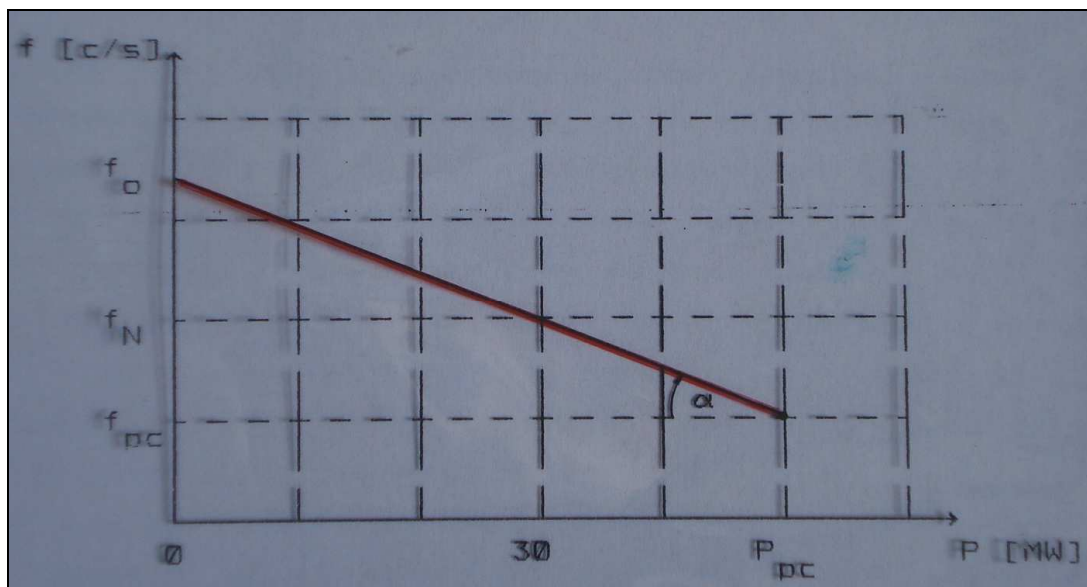


FIGURA 14

Se define al estatismo o regulación permanente como:

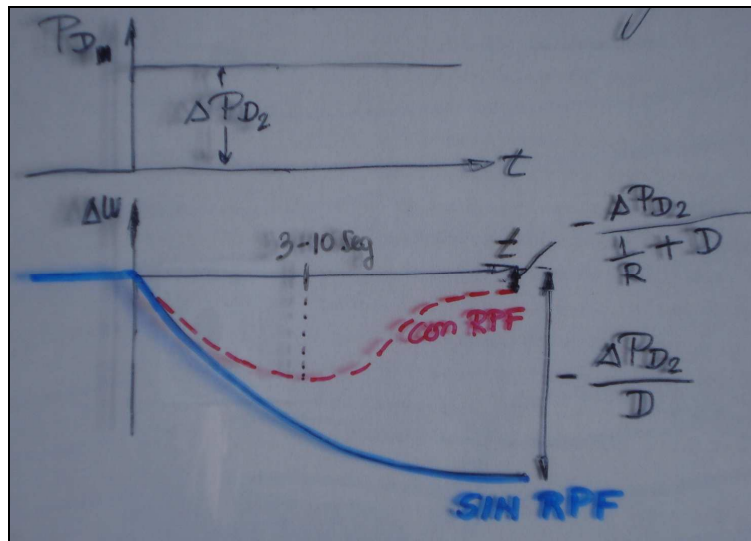
$$R = \frac{f_o - f_{pc}}{f_N} = \frac{\Delta f}{f_N} [\%] \quad (4-7)$$

f_o = frecuencia con carga cero

f_{pc} = frecuencia a plena carga

f_N = frecuencia nominal

R es la proporción que se modifica (disminuye) la f en el caso que la carga pase de la marcha en vacío a plena carga en [%] de la f. Su valor generalmente oscila entre 3 y 6 [%].



Ejemplo: $R = 6 [\%]$ $f_N = 50 [Hz]$ $P_N = 100 [MW]$

$$R_N = \Delta f = 0.06 \times 50 [Hz] = 3 [Hz]$$

cuando la potencia del generador varía de 0 a 100 [MW]. Existe otra manera de definir la característica de un regulador de velocidad:

$$K = - \frac{\Delta P_G}{\Delta f} [MW / 0.1Hz] \quad (4-8)$$

La Energía Reguladora K, es la relación que existe entre la variación de potencia generada, expresada en [MW] o [%] referida a la potencia nominal de la unidad, y la variación de frecuencia correspondiente.

$$Si \ \Delta P_G = P_{pc} - 0 \quad y \quad -\Delta f = f_o - f_{pc} \Rightarrow K = \frac{P_{pc}}{R \times f_N} [MW / Hz]$$

$$K = \frac{100}{f_o - f_{pc}} [\% / Hz] = \frac{10}{f_o - f_{pc}} [\% / 0.1Hz] \quad K = \frac{10}{R * f_N} [\% / 0.1Hz]$$

IV-3. Regulación Secundaria de Frecuencia (RSF)

Se supone tener un valor de:

$$R = 0.06 \text{ pu (6\%)} \Rightarrow \Delta f = 0.06 * 50 = 3 \text{ Hz}$$

si la $f_N = 50 \text{ Hz}$ está centrada en la característica de regulación \Rightarrow la faja de variación estará comprendida entre:

$$f_o = 51.5 \text{ Hz} \quad \text{y} \quad f_{pc} = 48.5 \text{ Hz}$$

Estos valores de f son inadecuados para la operación normal del sistema. Para corregir este problema, y además para poder repartir convenientemente la generación entre el parque generador para cubrir la demanda, se ideó la llamada regulación secundaria. Esta regulación se logra mediante la no fijación del punto P (se le da la posibilidad de desplazarse hacia arriba o hacia abajo, en forma manual o automática), como se muestra en la FIG 15.

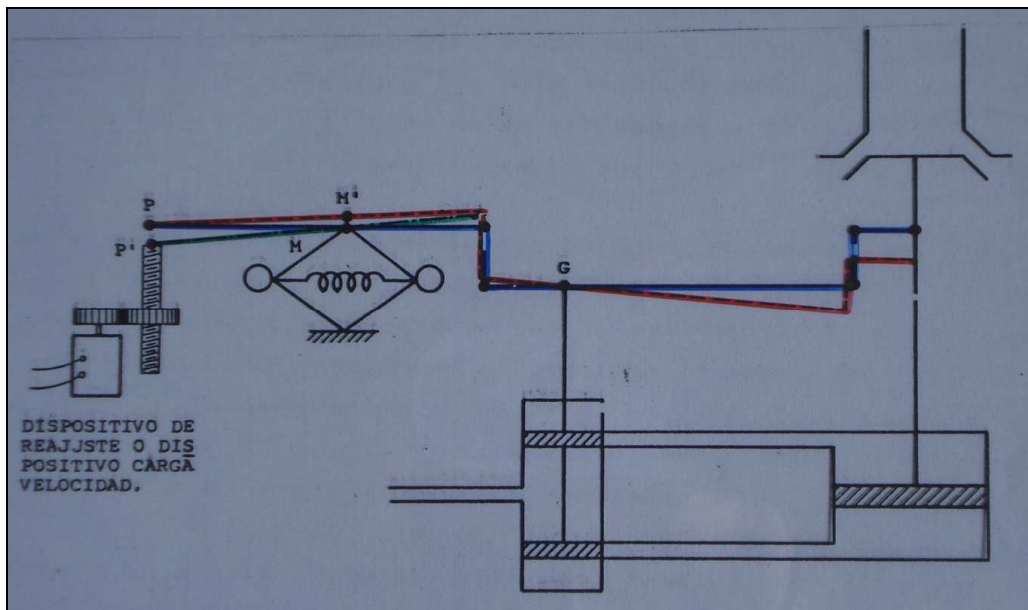


FIGURA 15

Tal regulación se traduce en el desplazamiento de la característica de regulación del regulador con estatismo, paralela a ella misma (ver FIG. 16), es decir, moviendo el punto P del regulador se consigue variar la f de operación del grupo generador que alimenta una carga, y ajustar la f al valor deseado, eliminando el residuo de desvío de f dejado por la regulación primaria. La RSF se realiza con un grupo de unidades generadoras hidráulicas y/o térmicas, habilitadas para tal fin, que se comandará en forma centralizada y por medio de un solo operador.

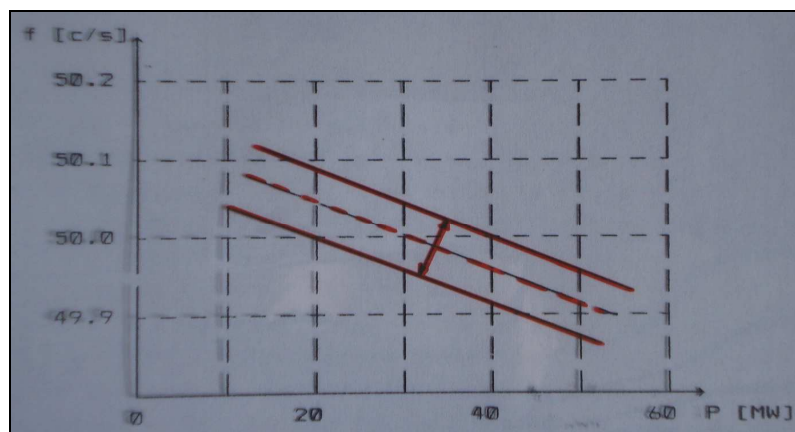


FIGURA 16

IV-4. Combinación de la Autoregulación y los Reguladores de Velocidad

1. CON AUTOREGULACION NULA ($AM=0$)

La FIG. 17 da la respuesta de los reguladores para un incremento de carga ΔP con $AM = 0$.

La condición inicial está representada por la intersección de las características GG y CC (punto I_N). En este caso la carga no varía con la f . Cuando se produce por ejemplo un aumento de carga ΔP , el equilibrio se da a una f_1 menor a la nominal, siendo ahora el punto I_1 producto de la intersección de GG y C'C'. Actuando sobre la regulación secundaria, se puede encontrar el nuevo punto I_2 como la intersección de las características G'G' y C'C'. De esta manera se logra cubrir la demanda exigida y mantener al mismo tiempo la f del sistema.

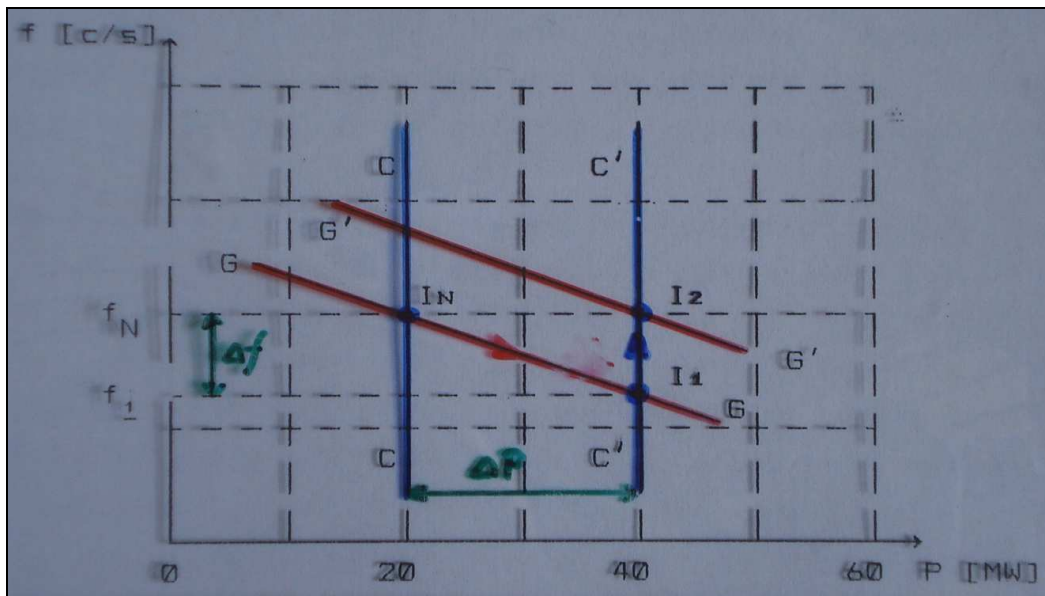


FIGURA 17

2. CON AUTOREGULACION POSITIVA (AM > 0)

La FIG. 18 da la respuesta de los reguladores para un incremento de carga ΔP con $AM > 0$:

El punto I_N se encuentra como en el caso anterior. Se carga el sistema con el mismo valor anterior ΔP , encontrándose el punto I_1 como la intersección de las características GG y CC. Actuando sobre la regulación secundaria, se lleva la GG a G'G' encontrándose el punto I_2 en la intersección con C'C'. Se debe notar que para este caso, la caída de f ($f_N - f_1$) después de actuar la regulación primaria, es menor que en el caso anterior, a pesar que el aumento de carga fue el mismo. Es decir que el amortiguamiento del sistema favorece la actuación de la regulación.

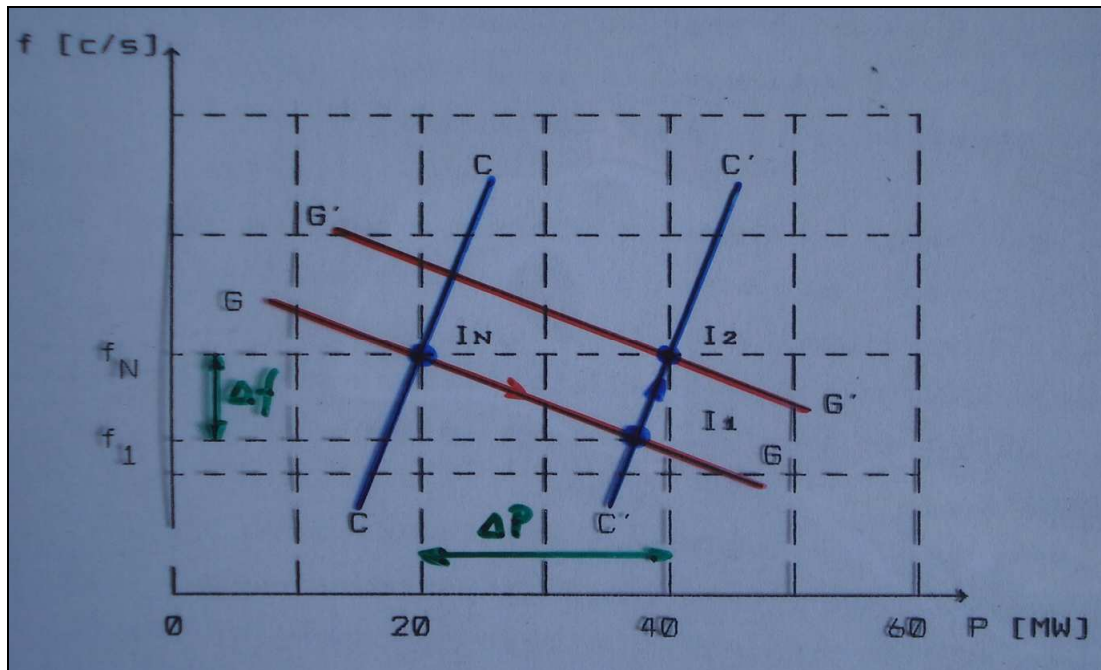


FIGURA 18

La Energía Reguladora Equivalente del Sistema KE_S (en este caso constituido por una sola área), está dada por:

$$KE_S = K_S + AM_S \text{ [MW/0.1Hz]} \quad (4-10)$$

donde:

$$K_S = \sum_{i=1}^{n_o} K_i \text{ [MW/0.1Hz]} = \text{Energía Reguladora de todos los reguladores del sistema} \quad (4-11)$$

$$K_i \text{ [MW/0.1Hz]} = \text{Energía Reguladora del regulador de la unidad } i$$

n_o = número de unidades generadoras que tienen regulador

$$AM_S \text{ [MW/0.1Hz]} = \text{Coeficiente de Amortiguamiento del Sistema}$$

V - REGULACION DE GENERADORES EN PARALELO

El estatismo permanente de los reguladores están entre 4 y 7%. SE operan las máquinas en Regulación Primaria de Frecuencia, sin ningún tipo de limitación, por lo menos dentro de la banda de la frecuencia de referencia en operación normal (habitualmente 50 Hz), +/- 0,2 Hz.

Suponer que se tienen dos generadores con las características mostradas en la Fig. 19, y suponer que la carga no varía con la f (AM=0). Un incremento de carga ΔP_D causará una disminución de f en la cantidad Δf . La acción de los reguladores primarios hará que se incrementen las potencias generadas G de tal manera que:

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

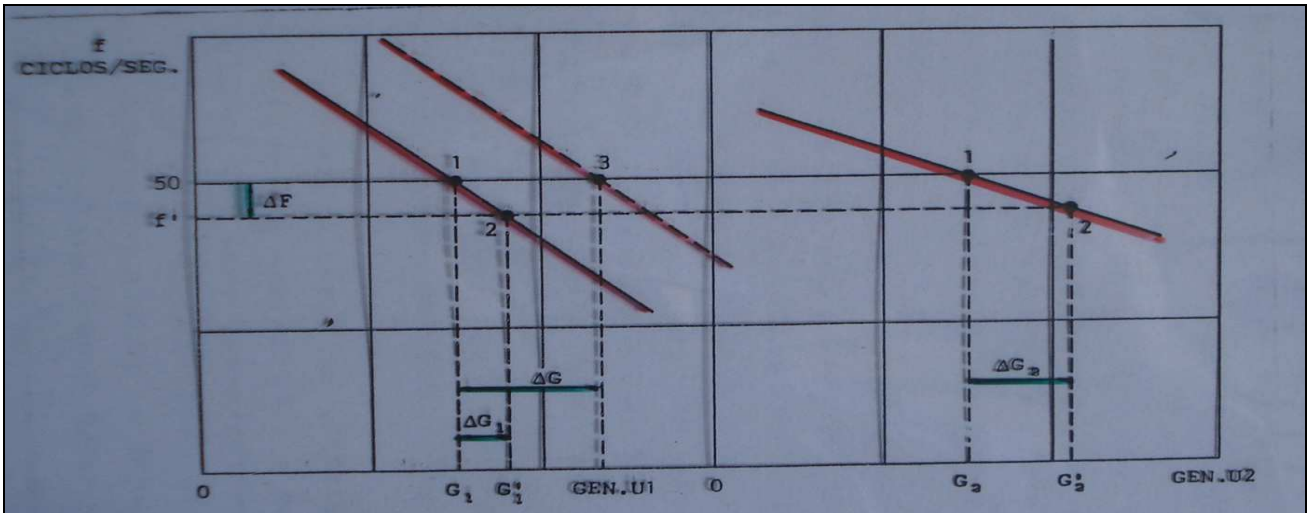
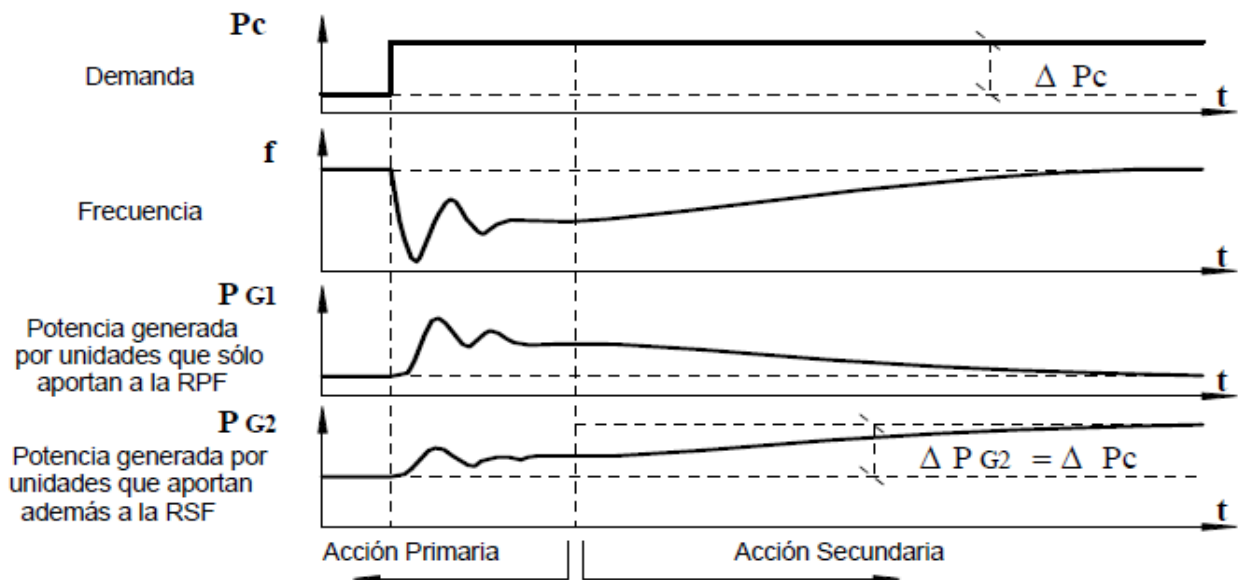
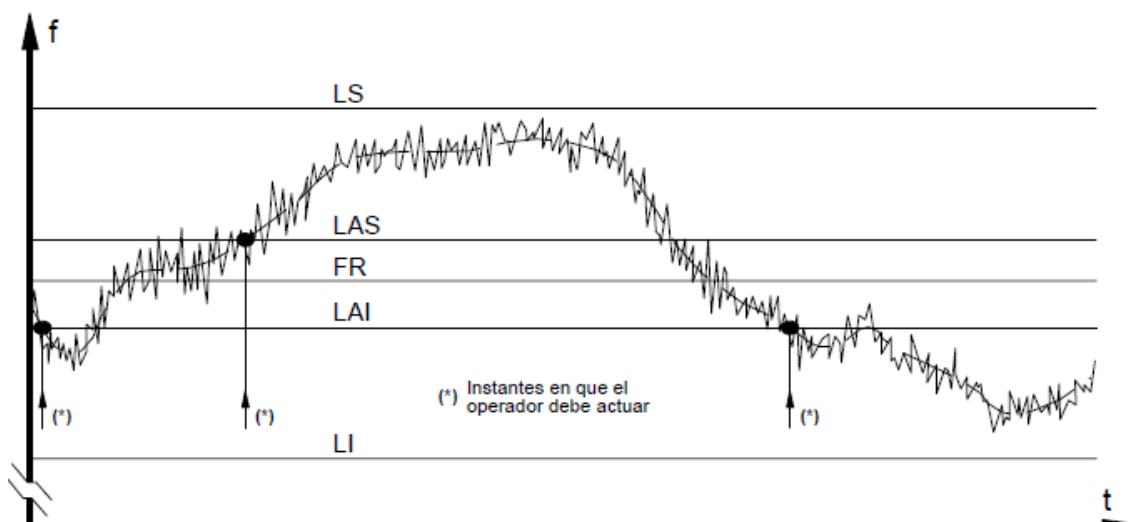


FIGURA 19

Si no se desea tener la distribución de potencia que da la regulación primaria, se puede hacer una reacomodación de la carga, haciendo uso de la regulación secundaria. De acuerdo a un plan de carga preestablecido se decidió por ejemplo que sea el G_1 el encargado de tomar toda la variación de carga, se actúa por lo tanto solamente sobre el regulador secundario del G_1 . El G_2 volverá luego a la posición que tenía antes de que actuara su regulador primario.





En Argentina:

Los límites de operación dentro de los cuales deberá mantenerse la Frecuencia será de ($LS-LI=0,2$ Hz) alrededor de la Frecuencia de Referencia. Esta banda no se deberá superarse en condiciones normales.

Los límites de operación dentro de los cuales el operador deberá actuar sobre la RSF será de ($LAS-LAI=0,1$ Hz) alrededor de la Frecuencia de Referencia

REGULACION TERCIARIA (RTF) (error acumulado de frecuencia)

La señal de error de f usado en el control del sistema, resulta de la comparación de la f medida y una f patrón que no está afectada por la operación del sistema. Las fuentes de frecuencia patrón están normalmente constituidas por cristales de cuarzo (idénticas a las usadas en las estaciones transmisoras de radio), y controladas en forma precisa por diapason, o señales de radio de frecuencia patrón emitidas por órganos oficiales. A través de la acumulación de los desvíos instantáneos de f , es posible determinar la acumulación del error de tiempo, que está normalmente limitado a dos segundos (en adelanto o atraso). Cuando esta acumulación alcanza el límite de tiempo acordado, todos los sistemas interconectados alteran la frecuencia a un valor predeterminado, en una dirección que torna al error de tiempo igual a cero. De esta forma, la frecuencia del SEP retornará a la programada.

En Argentina, cuando la diferencia entre la hora sincrónica y la hora patrón, alcance o supere el valor de 10 segundos, el Centro de Control de Operación del SADI (COC) asignará la RTF dando como Frecuencia de Referencia, y en forma temporaria, un valor distinto de la nominal. La Frecuencia de Referencia no podrá diferir en más de $\pm 0,1$ Hz de la Frecuencia Nominal, para realizar la RTF. En las horas pico la FR deberá ser igual a 50,00 Hz en condiciones normales. La diferencia entre la hora patrón y la sincrónica no debe exceder los 30 segundos, en operación normal. La hora patrón coincidirá en todo momento con la hora oficial de la República Argentina.

VI - EJEMPLO

DATOS

Se considera el sistema aislado mostrado en la FIG. 20, compuesto de 3 unidades generadoras cuyas características son las siguientes:

	Potencia Nominal [MW]	Estatismo R [%]
Generador 1	100	5
Generador 2	250	4
Generador 3	200	4.5

El coeficiente de amortiguamiento AM del sistema vale:

$$AM = 3.75 \text{ [MW/hz]}$$

FIGURA 20

Suponer que el sistema esté operando inicialmente a 50 Hz cuando se alimenta la carga de 300 MW, y los generadores entregan la potencia mostrada en la FIG. 20. Sólo se dispone de la regulación primaria de todas las unidades.

CALCULAR

- La energía reguladora K de los G_1 , G_2 , y G_3 .
- El nuevo valor de la frecuencia del sistema cuando la carga aumenta 30 MW.
- Qué parte de este aumento de carga toma cada unidad generadora.

SOLUCION

a) La energía reguladora de una unidad i fue definida en el punto IV-2.2:

$$K_i = \frac{P_i}{R_i \cdot f}$$

de donde resulta:

$$K_1 = \frac{100}{0.05 \times 50} = 40 \text{ [MW / Hz]}$$

$$K_2 = \frac{250}{0.04 \times 50} = 125 \text{ [MW / Hz]}$$

$$K_3 = \frac{200}{0.045 \times 50} = 88.89 \text{ [MW / Hz]}$$

b) Considerando la regulación primaria de las unidades y el amortiguamiento del sistema a través de la regulación equivalente cuya expresión está dada por la ecuación (4-10), la variación de frecuencia que se produce ante una variación de carga de 30 MW, vale:

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{\sum_i \frac{n_o}{K_i} + AM} = -\frac{30}{40+125+88.89+3.75} = -0.116 \text{ [Hz]}$$

y la nueva frecuencia a la que el sistema se equilibra:

$$f = f + \Delta f = 50 + (-0.116) = 49.88 \text{ [Hz]}$$

c) El aumento de la carga se reparte entre las unidades generadoras de la siguiente forma:

$$\Delta P_1 = -\Delta f \times K_1 = -(-0.116) \times 40 = 4.64 \text{ [MW]}$$

$$\Delta P_2 = -\Delta f \times K_2 = -(-0.116) \times 125 = 14.5 \text{ [MW]}$$

$$\Delta P_3 = -\Delta f \times K_3 = -(-0.116) \times 88.89 = 10.31 \text{ [MW]}$$

La suma de las variaciones de generación resulta en:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = 29.45 \text{ [MW]}$$

Debido a la disminución de la carga al disminuir la frecuencia (expresado a través del coeficiente de amortiguamiento AM), el aumento real de la carga con el sistema operando a 49.88 [Hz], resulta de 29.45 [MW] en lugar de los 30 [MW] iniciales. Si no se considera el amortiguamiento del sistema (AM = 0), el ΔP calculado debe ser igual a la variación de carga ocurrida.

Bibliografía

- (1) Olle I. Elgerd, "Electric Energy Systems Theory", Second Edition, 1982, Mc Graw-Hill
- (2) Jacinto Viqueira Landa, "Redes Eléctricas", Segunda Parte, México, 1970, Representaciones y Servicios de Ingeniería.
- (3) Aloisio Wood Noronha, "Noções sobre o Controle de Geração", 1988, Brasil.
- (4) Buhhold-Happoldt, "Centrales y Redes Eléctricas", Editorial Labor SA, 1966
- (5) Nathan Cohn, "Control of Interconnected Power Systems", Industrial Control Systems.
- (6) Robert Miller, "Operação de Sistemas de Potencia", 1988.
- (7) Glover, D., Sarma M., "Power System Analysis and Design", PWS Publishers, Boston, 1989.

Procedimiento Técnico nº 9 de CAMMESA "PARTICIPACIÓN DE GENERADORES EN EL SERVICIO DE REGULACIÓN DE FRECUENCIA DEL MEM"

http://portalweb.cammesa.com/Pages/BackupBotoneraAneriorIzquierda/Normativa/procedimiento_s.aspx