

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



INTRODUCCION A LA INTERCONEXION DE
LOS SISTEMAS ELECTRICOS
DE POTENCIA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A

JOSE ANTONIO CERRILLO RAMIREZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE GENERAL

	PAG
GENERALIDADES.....	1
CAPITULO I	
COMPORTAMIENTO DE LOS GENERADORES.....	4
I.1 VARIACION DE FRECUENCIA.....	4
I.2 CARACTERISTICA DE GENERACION.....	6
I.3 CARACTERISTICA DE LA CARGA.....	14
I.4 REGULACION DE LA FRECUENCIA.....	19
I.5 POTENCIA DE RESERVA.....	25
CAPITULO II	
INTERCONEXION DE AREAS.....	31
II.1 CONTROL DE AREAS INTERCONECTADAS.....	32
II.2 CAUSAS DE DESVIACION EN LOS PROGRAMAS.....	41
II.3 ERROR DE TIEMPO E INTERCAMBIO INADVERTIDO.....	51
II.4 CORRECCION DE ERROR DE TIEMPO.....	56
II.5 CORRECCION DE INTERCAMBIO INADVERTIDO.....	58
II.6 INTEGRAL DE TIEMPO DEL ERROR DE CONTROL DE AREA.....	66
II.7 ECUACION PARA USO PRACTICO.....	67
II.8 COMENTARIOS.....	70
BIBLIOGRAFIA.....	71

G E N E R A L I D A D E S

Este trabajo esta constituido fundamentalmente de dos partes, en la primera se estudia el comportamiento de los generadores, y se introduce una serie de conceptos y parámetros, con los cuales se relaciona una planta generadora con las cargas a las que alimenta; esta parte se encuentra acompañada de ejemplos numéricos los cuales deberán hacer más explícito el tema.

El uso de las expresiones matemáticas aquí planteadas, así como su posible utilización en la solución de un problema específico se exponen con objetividad; también se encuentran incluidas una serie de figuras, cuyo fin es el mismo - que los ejemplos, el de ilustrar todos los conceptos ya vertidos con anterioridad.

Así mismo se mencionan de una manera breve los controles usados en máquinas generadoras para obtener el resultado deseado.

En la segunda parte ya con el conocimiento de lo expuesto en la primera, se entra de lleno al estudio de los sistemas interconectados, se presenta la importancia de la frecuencia de operación como criterio fundamental de decisión en los intercambios de potencia de las áreas interconectadas, también se plantea la ecuación del error de control de área ecuación que partiendo de una relativa simplicidad se va sofisticando por la paulatina introducción de diversos parámetros - cuyo objetivo es el de hacer lo más completo posible el análisis del intercambio-

de potencia, situación que dará por resultado una mayor exactitud y confiabilidad en las decisiones que se tomen respecto a la solución del error de control de - - área.

De las ecuaciones, las más importantes son representadas mediante diagramas de flujo los cuales pueden en un momento dado proporcionar una impresión más concreta de los parámetros manejados, aunque para una comprensión más completa es necesario remitirse al texto.

Finalmente se presenta una ecuación práctica a la que se puede recurrir cuando no se poseen los medios para introducir los elementos manejados en la ecuación más completa.

CAPITULO I

COMPORTAMIENTO DE LOS GENERADORES

- I.1 VARIACION DE FRECUENCIA
- I.2 CARACTERISTICA DE GENERACION
- I.3 CARACTERISTICA DE LA CARGA
- I.4 REGULACION DE LA FRECUENCIA
- I.5 POTENCIA DE RESERVA

COMPORTAMIENTO DE LOS
GENERADORES.

Este capítulo tiene la finalidad de presentar los diversos parámetros - que afectan el comportamiento de los generadores, analizándose por medio de ejemplos los diferentes casos que se presentan debido a las fluctuaciones en los requerimientos de potencia, siendo estos:

I.1 VARIACION DE FRECUENCIA.

La potencia consumida en un sistema eléctrico varía en función del tiempo. Una diferencia entre la potencia consumida y la potencia generada causa una variación de frecuencia, ya que a esa diferencia corresponde un desequilibrio entre el par resistente y el par motor de las unidades generadoras.

Es importante hacer notar que desde este momento nos referiremos a potencia como un equivalente de par y a la velocidad como sinónimo de frecuencia, ya -- que su relación es directa: $W = 2 \pi f$.

En un diagrama (t, F) observamos, que la frecuencia varía alrededor de un valor nominal (50 ó 60 Hz.); estas variaciones se deben al cambio continuo de carga en el sistema.

En virtud de ésto, se pueden tener tres casos: si la carga aumenta la -- frecuencia baja; si la carga disminuye la frecuencia sube; si la carga permanece -- constante la frecuencia también, lo anterior es observado en las siguientes gráficas.

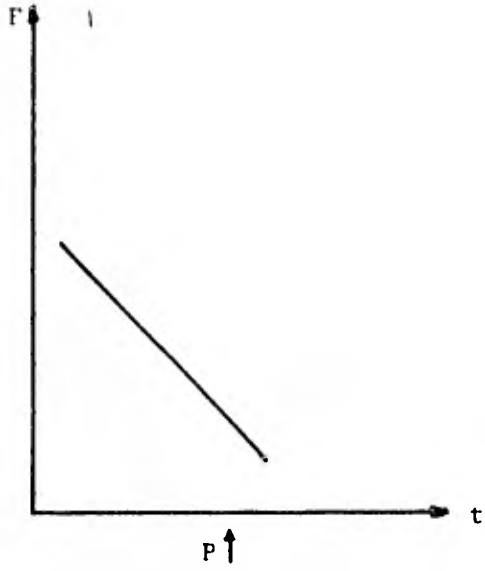


Fig. I.1a

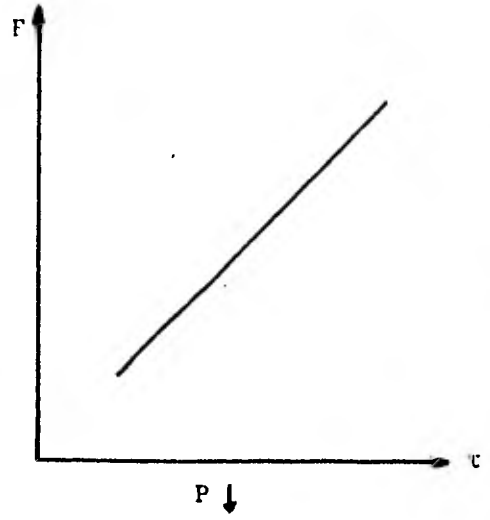


Fig. I.1b

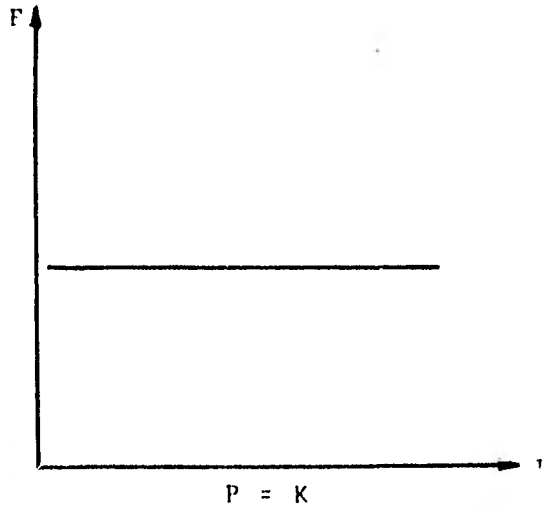


Fig. I.1c

Por lo tanto es importante detectar los cambios de frecuencia, ya que como observamos anteriormente éstos nos proporcionan una medida del desequilibrio de potencia en el sistema, es por esto que la frecuencia constituye el parámetro de control más adecuado.

I.2 CARACTERISTICA DE GENERACION

La variación de la frecuencia con respecto al cambio de potencia, determina el comportamiento del generador y nos define la característica de generación (N_g), la cual se puede expresar como:

$$N_g = \frac{\Delta P_g}{\Delta F} \quad \frac{\text{MW}}{\text{dHz}} \quad \dots\dots\dots 1.2.1$$

donde ΔP_g es el incremento de potencia generada y ΔF es la variación de frecuencia correspondiente al incremento de potencia mencionado.

Existen dos tipos de características de generación: ^aestática y estática tal como se muestra en la figura I.2a y I.2b respectivamente.

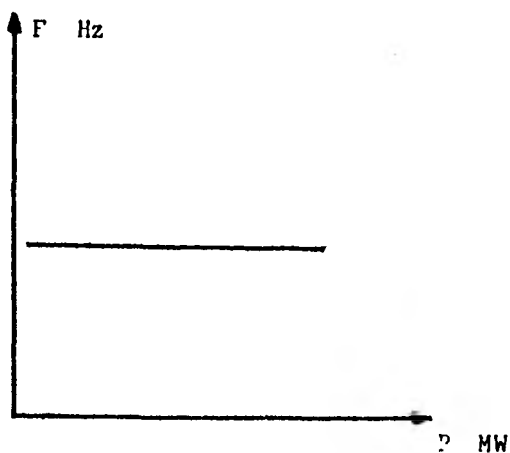


Figura I.2a

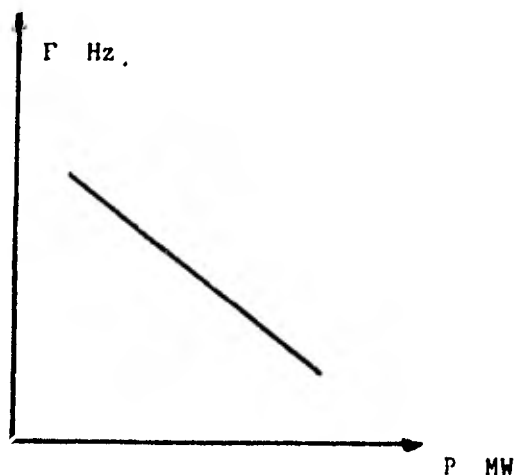


Figura I.2b

En la estática la frecuencia permanece constante para todos los niveles de potencia y en la estática existe una relación unívoca entre la frecuencia y la potencia.

Un parámetro importante dentro de nuestro estudio lo constituye el estatismo, el cual es propio de cada máquina y se define con el cambio de velocidad angular que se tiene al pasar de carga cero al cien por ciento de carga.

Expresado el estatismo en por unidad de la velocidad nominal, tenemos:

$$E = \frac{F_o - F_m}{F_n} \quad \text{p.u.} \quad \dots \text{I.2.2}$$

donde F_o es la frecuencia en vacío, F_m es la frecuencia a plena carga y F_n es la frecuencia nominal. El término $F_o - F_m$ se define como magnitud de estatismo y es representado por ϵ ; por lo tanto:

$$E = \frac{\epsilon}{F_n} \quad \text{p.u.} \quad \dots \text{I.2.3}$$

si consideramos el cambio de vacío a plena carga, tendremos que los términos de la ecuación I.2.1 toman los siguientes valores:

$$\Delta P_g = P_{gn}$$

$$\Delta F = F_o - F_m = \epsilon$$

reescribiendo la ecuación como:

$$N_g = \frac{P_{gn}}{\epsilon} \quad \dots \text{I.2.4}$$

Finalmente substituyendo I.2.3 en I.2.4 obtenemos:

$$N_g = \frac{P_{gn}}{E \cdot F_n} \quad \frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \quad \dots \text{ I.2.5}$$

o expresado en dHz

$$N_g = \frac{P_{gn}}{10 E \cdot F_n} \quad \frac{\text{MW}}{\text{dHz}} \quad \dots \text{ I.2.6}$$

en donde P_{gn} es la potencia nominal.

Una ecuación necesaria en la solución de problemas que involucran más de una máquina generadora, será la de la característica de generación de planta; - la carga total tomada por una planta es igual a la suma de las cargas tomadas por cada una de las unidades, y debido a que están conectadas en paralelo, la frecuencia deberá ser la misma en todas las unidades. Por lo tanto:

$$\text{si } N_{gp} = \frac{\Delta P_{gp}}{\Delta F} \quad \text{y}$$

$$\Delta P_{gp} = \Delta P_{g1} + \Delta P_{g2} + \dots + \Delta P_{gn}$$

entonces:

$$N_{gp} = \frac{\Delta P_{g1}}{\Delta F} + \frac{\Delta P_{g2}}{\Delta F} + \dots + \frac{\Delta P_{gn}}{\Delta F}$$

por lo tanto:

$$N_{gp} = N_{g1} + N_{g2} + \dots + N_{gn} = \sum_{i=1}^n N_{gi} \quad \dots \text{ I.2.7}$$

donde n es el número de unidades.

Hemos visto que a un incremento de potencia ocurre una disminución de -

frecuencia, empleando las ecuaciones presentadas anteriormente, obtendremos los valores, tanto del decremento de frecuencia como de la distribución del incremento de potencia en las máquinas generadoras.

Ejemplo I.2.1

Sea una planta constituida por dos máquinas generadoras en la cual ocurre un súbito aumento de carga, los parámetros de la planta se muestran en la tabla I.2.1

u/p	P _{gn} MW	E %	P _o MW		
A	20	2	10	$\Delta C = 20$	MW
B	50	3	35	$F_n = 60$	Hz
Planta	70	-	45		

Tabla I.2.1

Aplicando la Ec. I.2.6 para la máquina A se tiene:

$$Ng_A = \frac{20}{10(.02)(60)} = 1.6667 \quad \text{MW/dHz}$$

igualmente para la máquina B:

$$Ng_B = \frac{50}{10(.03)(60)} = 2.7778 \quad \text{MW/dHz}$$

La característica de generación de la planta viene dada por la Ec. I.2.7

$$Ng_p = 1.6667 + 2.7778 = 4.4445 \quad \text{MW/dHz}$$

el decremento de frecuencia de la planta será, de la Ec. I.2.1

$$\Delta F_p = \frac{20}{4.4445} = 4.5 \quad \text{dHz}$$

de aquí que el incremento de potencia en cada máquina sea:

$$\Delta P_{g_A} = 1.6667 (4.5) = 7.515 \quad \text{MW}$$

$$\Delta P_{g_B} = 2.7778 (4.5) = 12.51 \quad \text{MW}$$

Otra situación que puede presentarse ante un aumento de carga, es la saturación de una o más máquinas.

Definimos saturación de una máquina generadora al fenómeno que se presenta cuando se le demanda una potencia superior a su nominal.

Cuando tenemos una planta constituida por una sola máquina y ésta se satura, solo se podrá llevar una carga igual a la potencia nominal de la máquina para sostener el sistema.

Ahora bien en el caso de contar con una máquina no saturada conectada - en paralelo con la anterior, ésta tomará la carga restante al instante de saturación de la primera, ocurriendo una modificación en la característica de generación de planta, el siguiente ejemplo ilustra la anterior.

Ejemplo I.2.2

Tengamos nuevamente una planta con dos unidades cuyos datos son los de la tabla I.2.2

El incremento de carga tiene un valor de 20 MW, y el valor de la frecuencia nominal es de 60 Hz.

u/p	P _{gn} MW	E %	P _o MW
A	50	4	45
B	100	5	80
Planta	150	-	125

Tabla I.2.2

De la Ec. I.2.6 tenemos:

$$Ng_A = \frac{50}{10(.04)(60)} = 2.08 \quad \text{MW/dHz}$$

$$Ng_B = \frac{100}{10(.05)(60)} = 3.333 \quad \text{MW/dHz}$$

De la Ec. I.2.7

$$Ng_p = 2.08 + 3.333 = 5.41 \quad \text{MW/dHz}$$

El decremento de frecuencia de la planta viene dado por la Ec. I.2.1

$$\Delta F = \frac{20}{5.41} = 3.7 \quad \text{dHz}$$

El incremento de potencia en la máquina A, de la Ec. I.2.1

$$\Delta P_{g_A} = 2.08 (3.7) = 7.696 \quad \text{MW}$$

La potencia final de la máquina A será la suma de la potencia inicial - más el incremento.

$$P_f = 45 + 7.696 = 52.696 \quad \text{MW}$$

De aquí podemos ver que la potencia final es mayor que la nominal, por lo que la máquina A se satura; ahora podemos calcular el decremento de frecuencia-presentado hasta el momento de saturación, ya que el incremento de potencia permisible es la diferencia entre la potencia nominal y la potencia actual, substituyendo este valor en la Ec. 1.2.1, obtendremos el decremento de frecuencia deseado.

$$\Delta F_{As} = \frac{50 - 45}{2.08} = 2.4 \text{ dHz}$$

Enseguida calcularemos el incremento de potencia generado por la máquina B hasta el instante en que A se saturara.

$$\Delta P_{BA_s} = 2.4 (3.333) = 7.999 \text{ MW}$$

A partir de este momento N_{gp} es igual a N_{gB} , ya que la planta solo dispone de la máquina B para satisfacer la demanda de potencia, por lo que B deberá asimilar la carga restante (C_{ds}).

$$C_{ds} = \Delta C - P_{As} - P_{BA_s}$$

$$C_{ds} = 20 - 5 - 7.99 = 7.01 \text{ MW}$$

Mediante la Ec. 1.1, obtenemos el decremento de frecuencia:

$$\Delta F_{ds} = \frac{7.01}{3.33} = 2.1 \text{ dHz}$$

y el decremento total de frecuencia será:

$$\Delta F_t = \Delta F_{As} + \Delta F_{ds}$$

$$\Delta F_t = 2.4 + 2.1 = 4.5 \text{ dHz}$$

El incremento de potencia en la máquina B será:

$$\Delta P_{gB} = \Delta P_{BAs} + \Delta P_B$$

donde la ecuación I.1 nos da:

$$\Delta P_B = 2.1 \times 3.33 = 6.99 \text{ MW}$$

Por lo tanto:

$$\Delta P_{gB} = 7.99 + 6.99 = 14.98 = 15 \text{ MW}$$

Conclusión del ejemplo anterior:

El incremento de carga que acepta una máquina 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.

I.3 CARACTERISTICA DE LA CARGA.

La relación entre el decremento de frecuencia y el aumento de carga que lo origina, se define como característica de la carga, cuya pendiente es de signo contrario al de la característica de generación.

La característica de la carga se ve influenciada por la relación existente entre las cargas resistivas y las inductivas. Estas últimas son suministradas en su mayor parte por las cargas industriales, la característica de la carga - sufre un cambio de pendiente de acuerdo a la hora del día, haciéndose mayor en la noche y menor en el día. Lo anterior se puede visualizar en la figura I.3.1

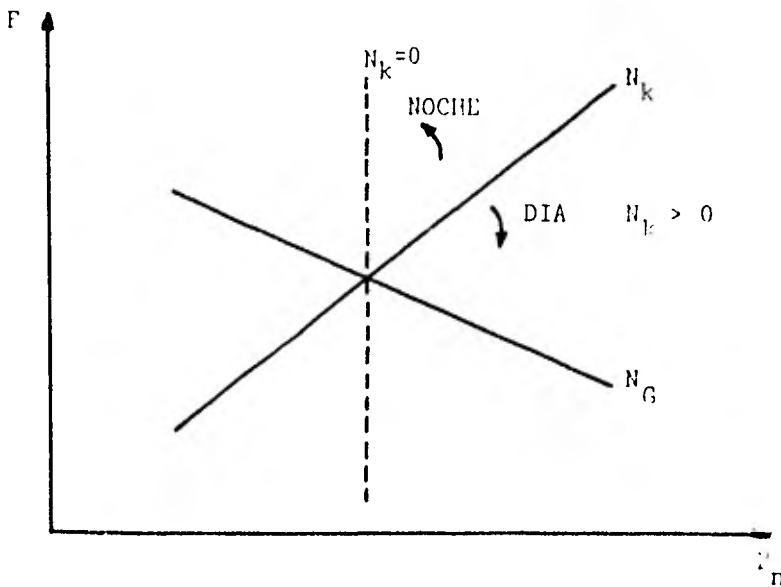


Fig. I.3.1

La pendiente de la característica de la carga nos da por lo tanto un -- efecto de amortiguamiento en el sistema. Definiremos el amortiguamiento de carga como la potencia necesaria de generar debido a una característica de carga diferente de cero.

Podemos considerar que el par se mantiene constante o cuando menos que no varía en relación directa con la frecuencia, luego entonces, al ocurrir una disminución de frecuencia por un incremento de carga, la potencia demandada por todas las máquinas conectadas al sistema descenderá, creando el amortiguamiento de la -- carga.

En los problemas planteados anteriormente habíamos considerado que la -- carga era puramente resistiva, es decir:

$$N_K = \frac{\Delta K}{\Delta F} = 0 \quad \dots \text{I.3.1}$$

en donde:

N_K = característica de la carga.

ΔK = amortiguamiento de carga.

ΔF = decremento en la frecuencia.

En la Fig. I.3.2, la intersección de la característica de generación -- con la característica de carga puramente resistiva nos define el punto t, el cual nos indica el decremento de frecuencia para esta condición; si $N_K \neq 0$, la abscisa del punto de cruce N_K y N_G , t' , da la potencia real generada.

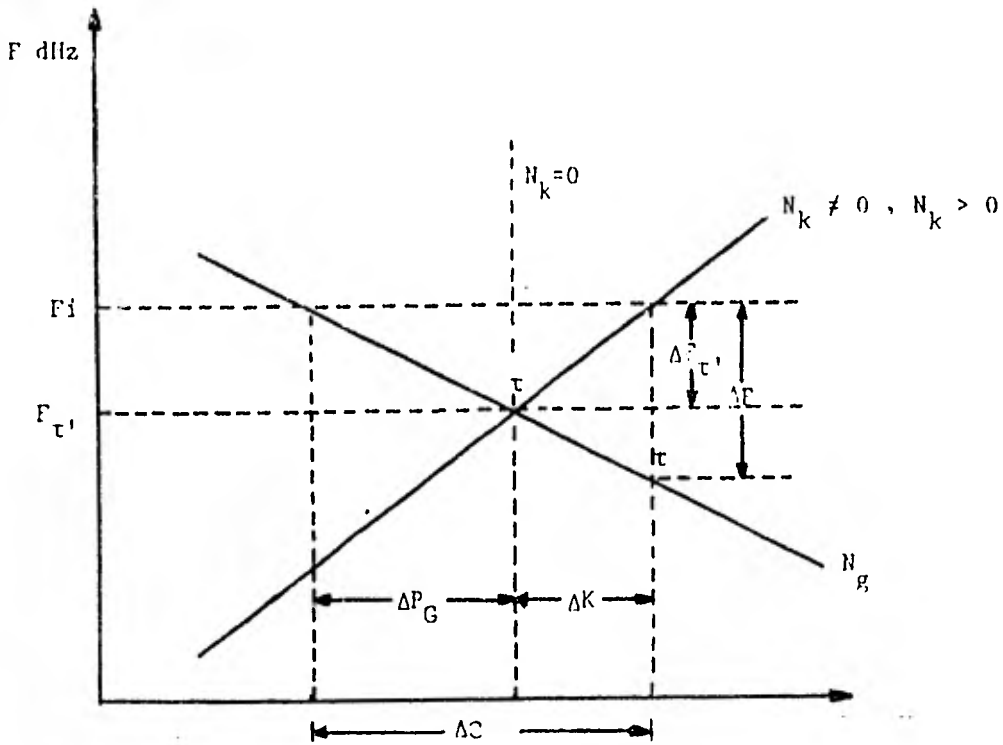


Fig. I.3.2

Donde:

- ΔC = incremento total de la carga.
- ΔP_G = incremento en la potencia generada.
- ΔK = potencia no necesaria de suministrar debido a N_K
- ΔF = decremento de frecuencia a $N_K = 0$.
- $\Delta F_{\tau'}$ = decremento de frecuencia a $N_K \neq 0$.
- F_i = frecuencia inicial.
- $F_{\tau'}$ = frecuencia final.

En forma analítica se tiene que:

$$\Delta C = \Delta P_G + \Delta K \quad \dots I.3.2$$

dividiendo entre ΔF_t , obtenemos:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C}{\Delta F_t} &= \frac{\Delta P_G + \Delta K}{\Delta F_t} \\ &= \frac{\Delta P_G}{\Delta F_t} + \frac{\Delta K}{\Delta F_t} \quad \dots I.3.3 \end{aligned}$$

substituyendo I.1.1 y I.3.1 en I.3.3, tenemos:

$$\frac{\Delta C}{\Delta F_t} = N_G + N_K$$

al término $\frac{\Delta C}{\Delta F_t}$ se le llama característica del sistema (N_s), de donde:

$$N_s = N_G + N_K \quad \dots I.3.4$$

En usual expresar la característica de carga de una manera porcentual; $N_K = X\%$ significando con esto que a una variación de $X\%$ en la potencia corresponde una variación del 1% en la frecuencia.

Expresado analíticamente:

$$N_K = \frac{X\% (P)}{1\% (F)} \quad \dots I.3.5$$

En el ejemplo I.2.1 se resolvió un problema de incremento de carga, con

siderando ésta puramente resistiva, a continuación se tratará el mismo problema -- para una característica de carga diferente de cero.

Ejemplo I.3.1

Tenemos ahora que, para la planta del ejemplo I.2.1 la característica de carga es de 2%, los datos son los mismos de la tabla I.2.1 que a continuación se reproduce:

u/p	P _{gn}	E	P _o	
	MW	%	MW	
A	20	2	10	$\Delta C = 20 \text{ MW}$
B	50	3	35	$F_i = 60 \text{ Hz}$
Planta	70	-	45	

de la Ec. I.3.5

$$N_k = \frac{2\%}{1\%} \frac{(P)}{(F)} = \frac{1.3}{6.0} = 0.2166 \frac{\text{MW}}{\text{dHz}}$$

Del ejemplo I.2.1

$$N_{gp} = 4.555 \frac{\text{MW}}{\text{dHz}}$$

sustituyendo en la Ec. I.3.4

$$N_s = 4.555 + 0.2166 = 4.7721 \frac{\text{MW}}{\text{dHz}}$$

De la Ec. I.2.1

$$\Delta F_t' = \frac{20}{4.7721} = 4.191 \text{ dHz}$$

La potencia que toma cada una de las máquinas es entonces, de la Ec. --

I.2.1

$$\Delta P_{gA} = 1.6667 \times 4.191 = 6.985 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{gB} = 2.7778 \times 4.191 = 11.642 \text{ MW}$$

por lo tanto:

$$\Delta P_{gP} = 18.627 \text{ MW}$$

Comparado este resultado con el obtenido en el ejemplo I.2.1, se observa que existe una diferencia tanto en el decremento de frecuencia como en el incremento de potencia, verificandose que la característica de carga positiva introduce un amortiguamiento en el sistema.

De la Ec. I.3.2:

$$\Delta K = 20 - 18.627 = 1.373 \text{ MW}$$

que es la potencia no generada.

I.4 REGULACION DE LA FRECUENCIA.

Una de las aplicaciones más importantes de la energía eléctrica es su utilización en cargas industriales, debido a que tanto la velocidad como la eficiencia de las máquinas conectadas se ven afectadas por frecuencias diferentes para la que estan diseñadas, por lo tanto se observa la gran importancia de mantener

la frecuencia dentro de un valor razonablemente constante.

Como hemos visto las variaciones de frecuencia son resultado de los cambios de carga en el sistema, por lo que, si queremos mantener la frecuencia a un valor determinado, debemos lograr el equilibrio entre la potencia generada y la carga, será pues necesario contar con un dispositivo que corrija los desequilibrios que de manera constante tienen lugar en el sistema.

I.4.1 Regulador o Control Primario.

La potencia real en un sistema eléctrico es controlada por medio del regulador, el cual actúa sobre los pares en las turbinas del sistema. Existen dos tipos de reguladores a saber: regulador astático o isódromo y regulador estático o con realimentación.

I.4.1.a Regulador Astático.

En la figura I.4.1 se representa esquemáticamente un regulador de velocidad de tipo astático. En éste tipo de regulador existe una sola posición de los émbolos del distribuidor para que el sistema se estabilice, esta posición corresponde a la frecuencia normal del sistema.

Debido a que los generadores cuando utilizan éste tipo de regulador - - tienden a aceptar el valor total del incremento de carga, el hecho de conectarlos en paralelo, traería como consecuencia que la repartición de la carga solo dependería de la rapidez de respuesta de los reguladores, originando múltiples oscilaciones antes de lograr un estado de equilibrio. Debido a ésto, su utilización se limita a los casos en que contamos con un solo generador para alimentar el sistema

o cuando por diversas consideraciones deseamos que una máquina dentro del sistema sea la primera en tomar carga completa.

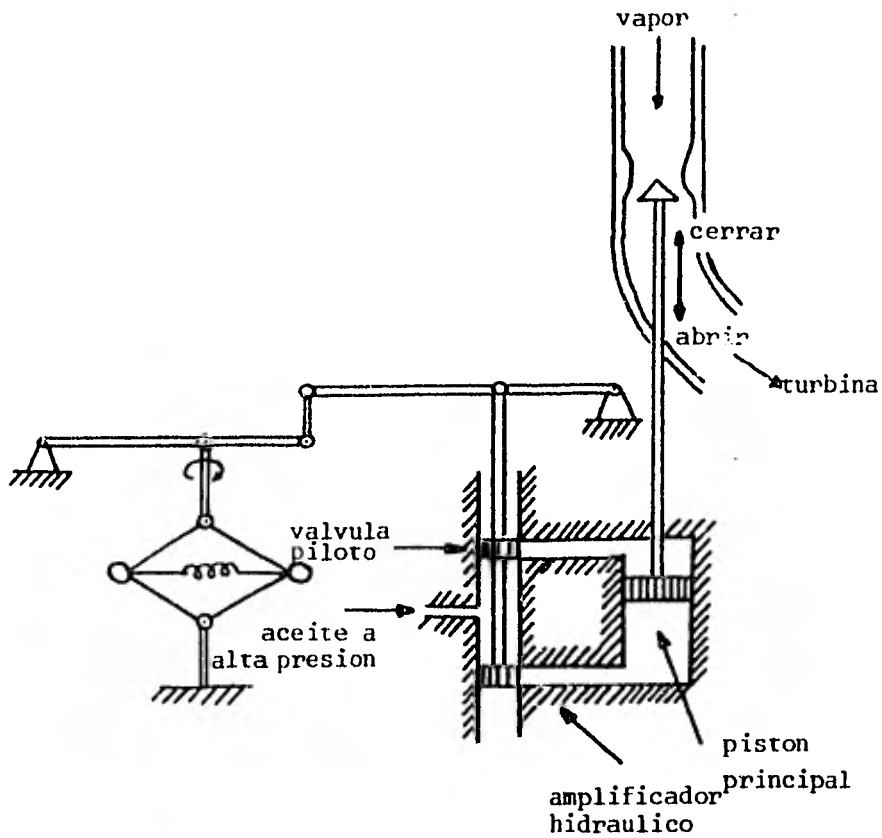


Fig. I.4.1

I.4.1.b Regulador Estático o con Realimentación.

En este tipo de reguladores existe más de una posición de equilibrio, - la regulación de los pares en la turbina se efectúa controlando la posición en las válvulas del mismo. La posición de la válvula piloto puede ser modificada de tres diferentes formas:

- 1.- Directamente por el movimiento del mando del cambiador de veloci--

dad.

2.- Indirectamente, por realimentación debida a cambios de posición en el pistón principal.

3.- Indirectamente, por realimentación debida a cambios de posición del punto B(Fig. I.4.2), como resultado de un cambio de velocidad.

La Figura I.4.2 muestra de un modo esquemático los principios de operación de un sistema de regulador de velocidad.

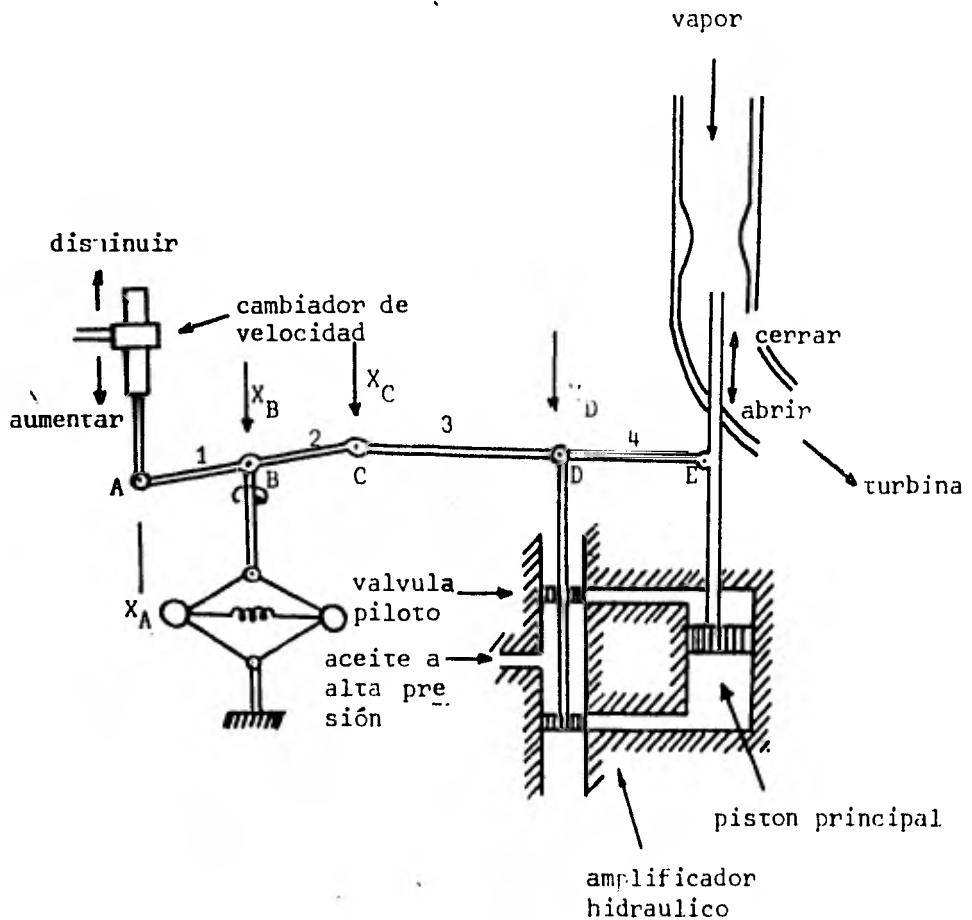


Fig. I.4.2

De un análisis cualitativo del regulador, se podrá observar que éste es capaz de llevar al sistema a un nuevo estado de equilibrio, el cual se encuentra a una velocidad diferente de la que tenía originalmente.

Al incrementarse la carga repentinamente y en los milise gundos siguientes al cierre del interruptor, la frecuencia no tiene un cambio significativo y -- por lo tanto la potencia no ha tenido tiempo de obtener un incremento en la turbina, por consiguiente la carga adicional total demandada es obtenida de la energía cinética almacenada en las partes rotatorias del sistema, con lo cual decrecerá en un valor inicial igual al de la energía demandada; en consecuencia la velocidad de crecerá; debido a este descenso, la válvula de la turbina es abierta por el regulado r y de esta manera, el generador incrementará su salida. También es importante aclarar que la velocidad es ahora descendente, se presentará un amortiguamiento de carga y entonces menos potencia necesitará ser generada; podemos en efecto conside rar que ello viene siendo una contribución directa a la nueva carga demandada.

En conclusión, como la velocidad está descendiendo, el incremento de -- carga se encuentra constituido por tres componentes a saber:

- 1.- Solicitud de energía cinética a las partes rotatorias de la máquina.
- 2.- Incremento de la generación.
- 3.- Amortiguamiento de la carga.

Inicialmente, las dos últimos componentes son cero, pero como la veloci dad disminuye ellas responden con un incremento en la generación. Consecuentemente, la energía cinética será consumida en un grado descendente, con lo cual, la de saceleración decrece al transcurrir el tiempo.

Eventualmente, la velocidad se nivelará a un nuevo valor constante menor; en éste momento la energía cinética es constante y el incremento de carga es obtenido de las dos últimas componentes solamente.

I.4.2 Control Secundario

Debido a que la acción del regulador primario solo proporciona la estabilidad básica del sistema, es necesario introducir un control más que nos lleve a recuperar la frecuencia a su valor nominal. Este control llamado secundario actúa sobre el cambiador de velocidad mediante un pequeño motor de corriente eléctrica llamado motor de sincronización.

Este control secundario puede ser de dos tipos: automático o manual. El control automático se efectúa mediante la comparación de la frecuencia del sistema con la frecuencia de referencia, obteniéndose así el error de frecuencia; ésta señal actúa sobre un generador de pulsos de potencia, que regulará el motor de sincronización (De acuerdo al signo del error éste dispositivo actuará, ya sea aumentando o disminuyendo la generación).

De lo anterior se deduce que una modificación en el cambiador de velocidad, da como resultado una variación en la potencia generada del sistema.

Consideramos la figura I.4.3, en la cual se presenta la característica-frecuencia - carga, antes y después de la acción del cambiador de velocidad.

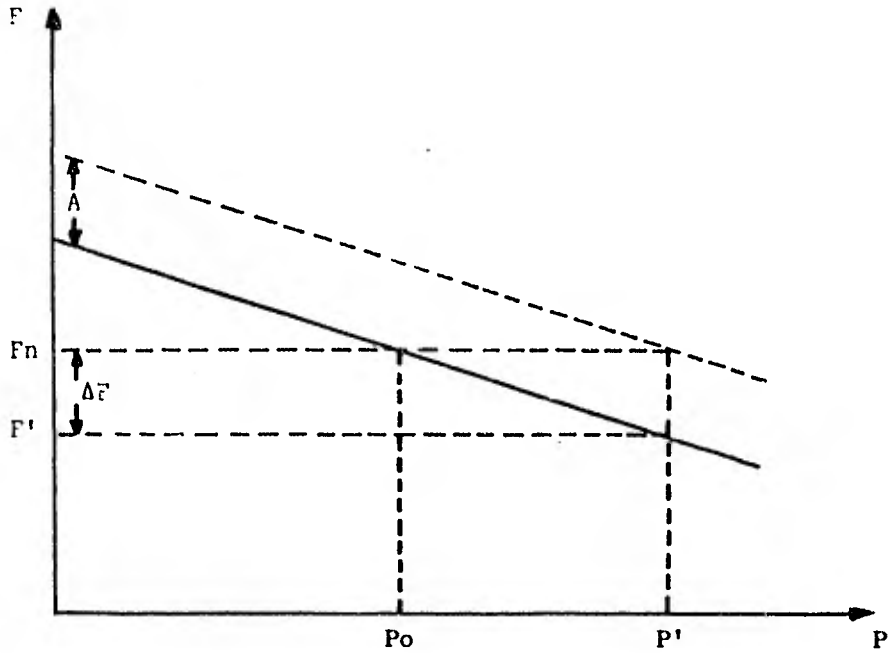


Fig. I.4.3

La línea continua nos representa el estado inicial en el cual se está suministrando una potencia P_0 a la frecuencia nominal F_n . Al presentarse un incremento de carga ΔP , la potencia resultante P' será suministrada a una frecuencia menor F' . La línea punteada representa el estado resultante después de la acción del cambiador de velocidad. Si llamamos A a la diferencia de ordenadas entre las dos rectas debido al desplazamiento paralelo de las características de generación y lo hacemos igual al valor de ΔF restauraremos la frecuencia a su valor nominal.

1.5 POTENCIA DE RESERVA.

Un sistema eléctrico de potencia será autosuficiente cuando su genera--

ción puede satisfacer sin problema la energía solicitada (carga). Gráficamente -- un sistema de este tipo puede representarse como en la figura I.5.1

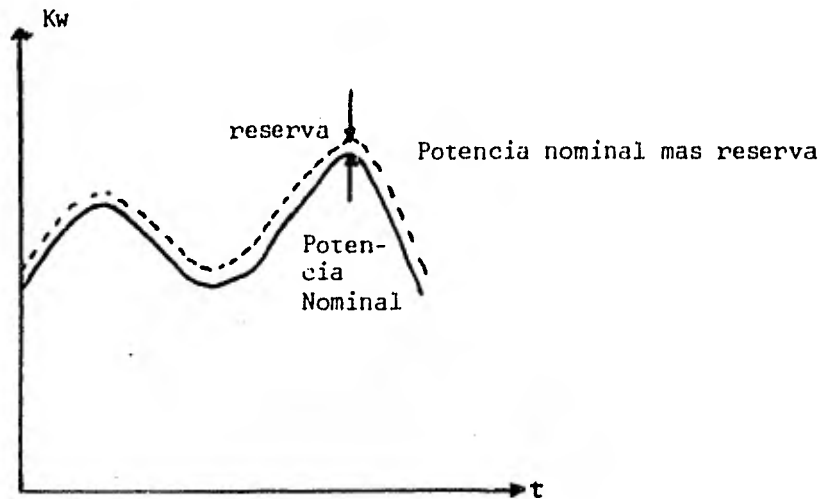


Fig. I.5.1

En la gráfica de la figura I.5.1 se representa la potencia de reserva, la cual se utiliza en casos de falla o para uso interno del sistema. La magnitud de la potencia de reserva se determina mediante un cálculo estadístico. Los efectos y funcionamiento de este tipo de potencia se visualiza mejor en el ejemplo - - I.5.1:

Ejemplo I.5.1

Sea un sistema con dos posibles arreglos de generadores como se muestra en la figura I.5.2:

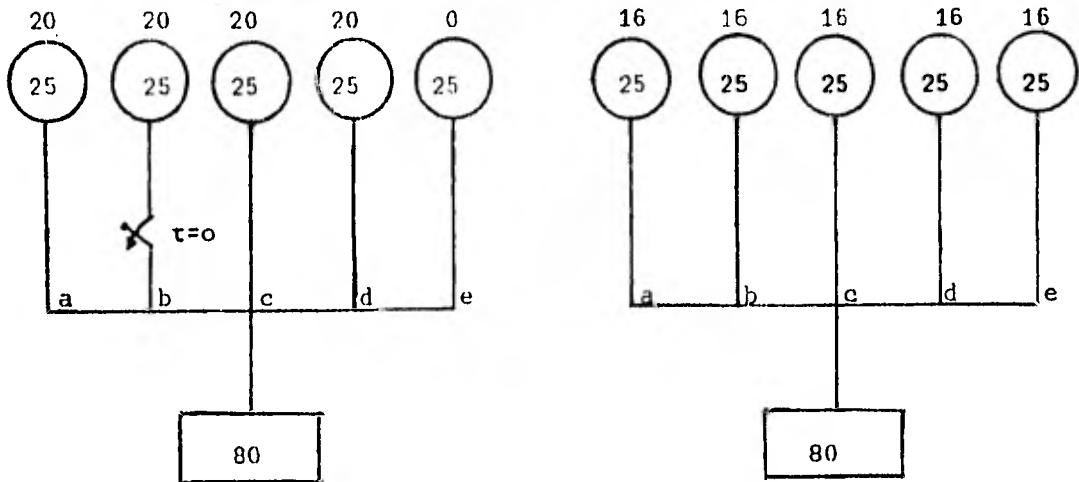


Fig. I.5.2

En la arreglo A, la unidad (e) está funcionando en vacío, es decir, con carga cero, esto sucede en condiciones normales.

En B las cinco unidades están generando la misma potencia. Suponiendo que ocurra una falla y sea la unidad (b) la que sale del sistema. ¿Cuál de los dos arreglos será el más conveniente en cuanto a variación de frecuencia?. Considerar estatismo igual a 5% en ambos arreglos.

Calcularemos primero la característica de generación de cada una de las unidades en funcionamiento del arreglo A:

$$N_G = \frac{P_n}{10(E)(F_n)}$$

$$N_{G_a} = N_{G_e} = N_{G_d} = N_{G_e} = \frac{25}{10(.05)(60)} = 0.8333 \text{ MW/dHz}$$

Siendo la misma característica de generación en cada una de las unidades, la del sistema será:

$$N_{G_{\text{sist}}} = 4 \times .8333 = 3.3333 \text{ MW/dHz}$$

luego, la variación de frecuencia será:

$$\Delta F = \frac{\Delta C}{N_{G_{\text{sist}}}} = \frac{20}{3.333} = 6 \text{ dHz}$$

y el incremento de potencia será:

$$\Delta P = \Delta F \times N_G = 6 \times 0.83333 = 4.999 \text{ MW}$$

Pasemos ahora al arreglo B:

$$N_{G_a} = N_{G_c} = N_{G_d} = N_{G_e} = \frac{25}{10(.05)(60)} = 0.8333 \text{ MW/dHz}$$

Para el sistema se tiene:

$$N_{G_{\text{sist}}} = 4 \times .83333 = 3.3333 \text{ MW/dHz}$$

La variación de frecuencia es:

$$\Delta F_o = \frac{16}{3.33} = 4.8 \text{ dHz}$$

y el incremento de potencia de cada una de las unidades:

$$\Delta P = 4.8 \times 0.8333 = 4 \text{ MW}$$

Tomando en cuenta las variaciones de frecuencia de uno y otro arreglo vemos que es B quien tiene menor variación (4.8).

Para selección de alternativas de este tipo también se toma en cuenta el factor económico, tomando en cuenta que los incrementos de carga los toma la -- unida o unidades que sean más económicas mientras que la división de carga la toma la unidad o unidades menos económicas.

Habiendo considerado el ejemplo anterior, podemos ver que cuando la carga se reparte entre un número de unidades mayor que el normal, las variaciones de frecuencia debidas a un incremento de carga son menores. También el peligro de -- que una máquina se sature disminuye.

C A P I T U L O I I

INTERCONEXION DE AREAS

- II.1 CONTROL DE AREAS INTERCONECTADAS.
- II.2 CAUSAS DE DESVIACION EN LOS PROGRAMAS.
- II.3 ERROR DE TIEMPO E INTERCAMBIO INADVERTIDO.
- II.4 CORRECCION DE ERROR DE TIEMPO.
- II.5 CORRECCION DE INTERCAMBIO INADVERTIDO.
- II.6 INTEGRAL DE TIEMPO DEL ERROR DE CONTROL DE AREA.
- II.7 ECUACION PARA USO PRACTICO.
- II.8 COMENTARIOS.

II

INTERCONEXION DE AREAS

El concepto de área dentro del estudio de los sistemas interconectados es el de una zona delimitada geográficamente; eléctricamente coherente, con características de operación propia y autosuficiente.

Una zona será coherente desde el punto de vista eléctrico, cuando obtenemos igual medición de frecuencia en diferentes modos de ésta.

Idealmente debería hacerse la separación de áreas de control, tomando en cuenta la totalidad de los factores siguientes: el geográfico, el eléctrico, el administrativo y el de distribución uniforme de capacidad de control. Sin embargo debido a la dificultad de conjuntar los anteriores factores, el eléctrico tendrá una preponderancia tal, que determinará el criterio con el que se realice la división de las áreas.

La interconexión fue establecida inicialmente por razones económicas. El ejemplo clásico es el de dos áreas adyacentes, una cuya principal fuente de energía es hidráulica y otra que depende fundamentalmente de plantas térmicas, la creación de la interconexión de áreas, suministra un mercado para el exceso de aguas en las épocas de las grandes avenidas, así como la seguridad de un suministro adecuado durante los tiempos de sequía. Se observó que, aunado a esto, mejoraba tanto la calidad del servicio como la confiabilidad del sistema, ya que al ocurrir demandas repentinas de carga por la falla de alguna unidad en el sistema tendremos un conjunto de generadores que pueden respaldar la continuidad del servicio.

Así mismo, la calidad del servicio se ve mejorada debido a que en su parte inicial, los incrementos de carga en el sistema son obtenidos de la energía

cinética de las máquinas, causando con ésto un decremento de frecuencia, el cual será menor entre mayor sea la capacidad del sistema.

La interconexión de área también reduce la necesidad de potencia de reserva en cada una, ya que en caso de emergencia en una de ellas contaremos con la cooperación de las restantes.

II.1. CONTROL DE AREAS INTERCONECTADAS.

II.1.1 Bias y Errores de control de Area.

Si tenemos un sistema eléctrico de potencia dividido en varias áreas de control interconectadas y si queremos saber si la generación de cada sistema es suficiente para alcanzar el equivalente a la suma de la potencia de carga más el intercambio neto de potencia más las pérdidas de potencia de transmisión, debemos considerar el llamado error de control de área, el cual designaremos con la letra E. Mediante el E es posible realizar la función de control la frecuencia y la carga.

Para una área A, el error de control de área E está dado por:

$$E_A = (T_A - T_O) + N_A (\Delta F) \quad \dots\dots II,1.1.$$

en donde: T_A es el intercambio programado, T_O es el intercambio actual, N_A la característica de generación del sistema, y ΔF es la variación de frecuencia. Lo anterior se representa gráficamente en la figura II.1.1.

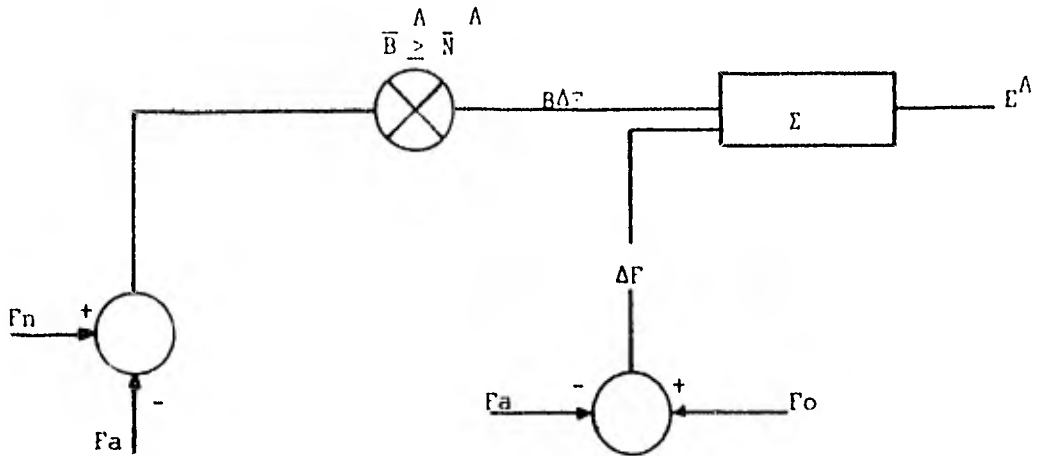


Figura II.1.1

En el control convencional de carga de sistemas de potencia interconectados, la frecuencia y la potencia intercambiada se mantiene a sus valores deseados por medio de la realimentación del error de control de área, conteniendo la -- disminución de frecuencia y el error de potencia en las líneas de interconexión y controlando los primotres de los generadores. Para cada área un bias determina la importancia relativa ligada al error de realimentación de frecuencia con respecto al error de realimentación de las líneas de interconexión de potencia. El bias (la relación de frecuencia a realimentación de potencia) es, como ya habíamos men-

cionado, muy frecuentemente igual a la característica de generación del área. Entonces el control secundario de cada área es en su primera aproximación sólo afectado por las perturbaciones de carga de su propia área pero no por las perturbaciones de las otras. Algunas veces se utiliza un bias más alto que la característica de área, garantizándose con esto asistencia al área que lo requiera, cuando exista desviación de frecuencia. Sin embargo, independientemente del bias utilizado, el control reducirá a cero el error de frecuencia y el error de intercambio de potencia después de una perturbación, siempre y cuando el área donde ésta ocurre, pueda acomodar el cambio de carga.

Con el desarrollo de los sistemas interconectados se ha ido modificando el tipo de control usado. Inicialmente se utilizó el FFC (flat frequency control), el cual funciona variando la generación del sistema cuando se presenta un cambio de carga, para equilibrar así la nueva potencia demandada y restaurar la frecuencia a su valor nominal, al tiempo que mantiene la potencia de intercambio dentro de los límites establecidos.

Otro tipo de control integral es aquel que actúa no solo cuando detecta un error de frecuencia, sino también cuando se presenta un error en la potencia de intercambio. Es decir, el dispositivo de reajuste de control integral deberá reducir a cero el error de frecuencia y el de potencia de intercambio simultáneamente. Este tipo de control se denomina control de intercambio con corrección de frecuencia FTL, y su comportamiento está dado por la siguiente ecuación:

$$B \Delta F + \Delta P_E = 0 \quad \dots \text{II.1.2}$$

Donde:

B = Bias de frecuencia del área MH/Hz

ΔF = Variación de frecuencia con respecto a la programada Hz

ΔP_E = Potencia exportada por el área de control MW

Tanto el sistema de control FFC como el FTL no consiguieron una buena regulación por lo que se creó un control más efectivo que combinara las características de los anteriores. Dicho control se conoce como TLB (tie line frequency control).

En un área regulada con un control TLB hay un número de variables interrelacionadas que influyen en la acción del control; esto incluye los cambios de carga en el área, la frecuencia resultante en el sistema y los cambios de energía almacenada; los cuales se reflejan en desviaciones en los programas de intercambio valores del bias, error de control de área, error de tiempo y acumulación inadvertida de intercambio.

Hay una aceptación universal y uso del concepto de control en el intercambio neto de potencia en las líneas de interconexión. Para cada control de área interconectada se utiliza la siguiente ecuación:

$$E = (T_1 - T_0) - 10 B(F_1 - F_0) \quad \dots II.1.3$$

Donde:

E = Error de control de área MW

T_1 = Intercambio neto del área. MW (Potencia de salida considerada como positiva).

T_0 = Intercambio neto programado del área MW

F_1 = Frecuencia del sistema Hz

F_0 = Frecuencia programada del sistema Hz

B = Bias de frecuencia del área MW/dHz (la cual tiene signo negativo).

Como se notará dicha expresión es analoga a la Ec. II.1.1.

El equipo del bias de control de interconexión en cada área tiende a reducir el error de control de área a cero. Cuando todas las áreas hacen ésto y ciertos criterios han sido satisfechos la interconexión logrará automáticamente su frecuencia programada F_0 y todos los intercambios netos serán los programados.

Los criterios para tal operación incluyen:

- 1.- El requerimiento de que todas las partes de la interconexión sean incluidas en un área y otra, tal que la suma en la generación de todas las áreas, cargas y pérdidas, sea la misma que la generación total del sistema, cargas y pérdidas.
- 2.- La necesidad de tener la suma algebraica de todos los intercambios netos programados de las áreas, igual a cero.
- 3.- El uso de una frecuencia programable común, para todas las áreas.
- 4.- La ausencia de errores de medición.

Todos estos criterios son entendidos, pero no siempre satisfechos; resultando desviaciones al programa de intercambio neto del área y frecuencia del sistema.

Sucede que, los controles en cada una de las áreas no siempre reducen su error de control de área a cero, como ya se había mencionado, es necesario que

los controles de área ajusten la generación, de modo que se mantenga concordante - con los cambios de carga, si el error de control de área se desea mantener en cero. Tales fallas en la regulación del área pueden ocurrir, debido a que el control de - área no demande con la suficiente rapidez los cambios de generación a las máquinas que esta regulando; o el control puede estar demandado una respuesta de generación adecuada, tan lejos como la magnitud y distribución de las señales de control co-- rrespondientes, pero persiguiendo un despacho económico programado; la fuente de - generación siguiente en línea que recibe estas señales de control, puede no tener - las características de respuesta o capacidad necesarias, por razones de permisi- bilidad de cambio de generación para armonizar con las demandas del control. Tam- bién puede ocurrir que el control regule, de tal manera, que origine cambios de ge- neración que excedan la relación de cambios de carga de área, con la correspondien- te creación del error de control de área.

No existe un criterio para valorar que es lo que constituye una buena - regulación de área, sin embargo, se puede de cualquier modo, realizar el exámen de algunos ejemplos de desviaciones con respecto a una regulación perfecta, evaluando sus manifestaciones y explorando algunas relaciones cuantitativas correspondientes.

Una serie de curvas hipotéticas que muestran los dos objetivos usuales - en la regulación de área son mostrados en la figura II.1.2. En la serie de gráfi- cas a la izquierda se muestran las curvas de error de control de área contra tiempo en las de la derecha se muestra, en las mismas coordenadas de tiempo, desviaciones del despacho económico óptimo. La descripción detallada de las curvas no tiene -- significancia particular para esta discusión, ya que la idea a mostrar para el - - error de control de área, es si se tiene un error que corre cercanamente a cero, o desviaciones apreciables a él. Las gráficas del despacho económico son expuestas-

para mostrar si la economía óptima está siendo regularmente aprovechada, o significativamente desaprovechada.

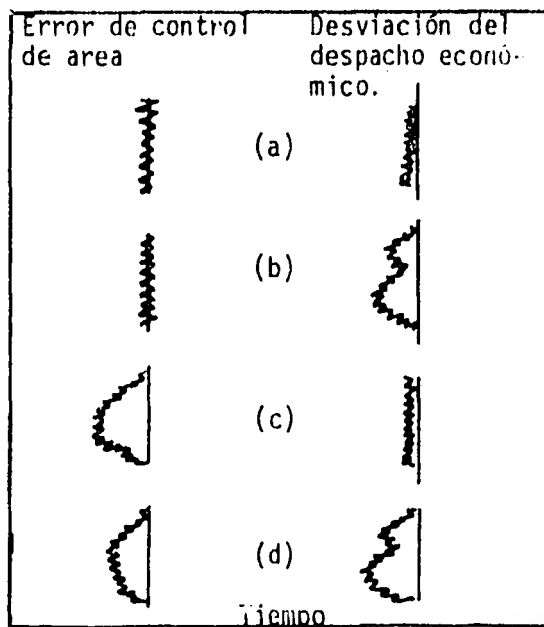


Figura II.1.2.

Las curvas en (a) muestran una excelente regulación de área. El error de control de área está tendiendo a cero al mismo tiempo que el despacho económico es conseguido. En (b), el error de control de área está nuevamente tendiendo a cero, pero en esta ocasión es logrado a expensas de la economía, observándose una desviación apreciable para el despacho económico. En (c) el error de control de

área está siendo aparentemente sacrificado para conseguir un despacho económico interno. En (d) la regulación falla y no consigue un error de control de área cercano a cero ni un despacho económico interno.

Desde el punto de vista de la interconexión, regulación en una de sus áreas, como en las expuestas en las curvas (a) y (b), son tomadas como excelentes, mientras que la regulación en (c) y (d), dejan que desear, y un análisis de la magnitud, duración y frecuencia de las desviaciones será necesario para poder decidir si es aceptable.

Las desviaciones a frecuencia programada en sistemas interconectados -- pueden ser generalmente tomadas como una indicación de la existencia de un error de control de área, en una o más de las áreas del sistema.

El error de control de área, de todas las áreas del sistema es obtenido mediante la suma del error de control de área de cada una de las áreas interconectadas pudiendose expresar en la siguiente forma:

$$\sum E = (\sum T_1 - \sum T_0) - 10 (\sum B) (F_1 - F_0) \quad \dots II.1.4.$$

Considerando que los cuatro criterios expresados anteriormente son llamados, $\sum T_0 = 0$, $\sum T_1 = 0$ y F_0 común para todas las áreas entonces la Ec. II.1.4 se transforma en:

$$\sum E = - 10 (\sum B) (F_1 - F_0) \quad \dots II.1.5$$

Puede verse ahora claramente que cuando una desviación de la frecuencia prevalece, el error de control de área existe en una o más de las áreas del sistema.

ma y su suma está dada por la Ec. II.1.5.

El error de control de un sistema de potencia aislado con un sólo control de área, es definido como la desviación de frecuencia existente; ahora bien, si tenemos un sistema que contiene varias áreas, el error de control resultante lo denominaremos de ahora en adelante, error de control del sistema (E_s).

Considerando condiciones de estado estable, un error de control que persiste en un área cualquiera puede significar la existencia de un desbalance entre la generación y la carga en el área o la necesidad de que el área contribuya a la regulación de frecuencia en el sistema, o ambas. Por otra parte, suponiendo nuevamente condiciones de estado estable, la existencia de un error de control del sistema no implica un desbalance entre la generación y la carga. Desde el punto de vista del sistema como un conjunto, tal balance existe, pero puede haber necesidad de redistribuir la generación entre las áreas.

Cuantitativamente, suponiendo un sistema con capacidad de 125,000 MW, y bias de 2%/0.1 Hz para todas las áreas, E_s será la suma algebraica de todos los errores de control e igual a 250 MW por cada 0.01 Hz de desviación de frecuencia, o 25 MW por cada 0.001 Hz de desviación de frecuencia. El uso de la desviación de frecuencia como índice del error del sistema, sugiere de los datos anteriores, la necesidad de contar con un alto grado de resolución en la medición de frecuencia.

La medición de frecuencia, es significativa por otra razón; ya que es un factor primordial en el cálculo del error de control de área y es la base en la cual, el bias de frecuencia es introducido a los cálculos.

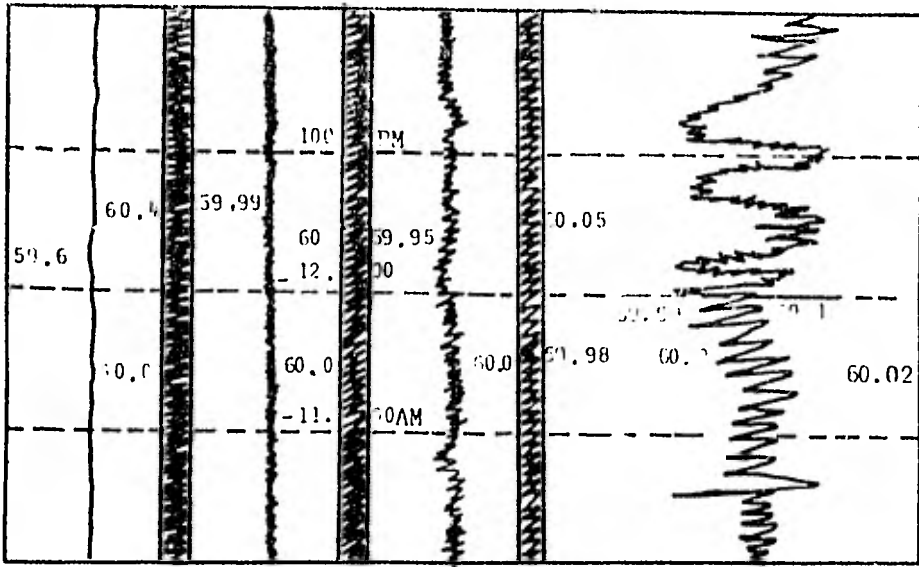


Figura II.1.3.

La figura II.1.3 es de interés ya que muestra la resolución de un sistema de frecuencia actual, graficado en diferentes escalas. Los registros fueron todos graficados simultáneamente con un ancho de escala de 58 a 62 Hz para A; en B el rango utilizado fue de 59.5 a 60.5 Hz; en C 59.25 a 60.25 Hz; finalmente en D, 59.95 a 60.05 Hz.

II.2 CAUSAS DE DESVIACION EN LOS PROGRAMAS

II.2.1 Errores y Compensaciones.

Consideraremos la posibilidad de errores de medición en los diferentes parámetros que intervienen en el error de control de área, analizando sus efectos-

y generando las soluciones correspondientes.

Partiremos de la ecuación II.1.3 la cual reescribiremos introduciendo - la notación indicial:

$$E_m = (T'_{1m} - T'_{0m}) - 10 B_m (F'_{1m} - F'_{0m}) \quad \dots \text{II.2.1}$$

Un diagrama esquemático que representa a la ecuación II.2.1 se muestra en la figura II.2.1.

Como primer paso en la exploración de la naturaleza de estas desviaciones introduciremos los parámetros necesarios para la consideración de los errores.

T_{1m} es el intercambio neto para el área M, como distinción del valor medido (T'_{1m}).

τ_{1m} es algún error en medición o en los cálculos del intercambio neto - de área M, tal que:

$$T'_{1m} = T_{1m} + \tau_{1m} \quad \dots \text{II.2.2}$$

Similarmente tenemos:

T_{0m} es congruente con el intercambio programado para el área como distinción del valor actual del intercambio (T'_{0m}).

τ_{0m} es algún error de compensación en la valoración del programa de intercambio neto del área, tal que:

$$T'_{0m} = T_{0m} + \tau_{0m} \quad \dots \text{II.2.3}$$

También tenemos:

F_1 es la frecuencia del estado estable real, como distinción del valor

medido (F'_{1m}).

θ_{1m} es algún error en la medida de la frecuencia en el área M, tal que

$$F'_{1m} = F_1 + \theta_{1m} \quad \dots \text{II.2.4}$$

Finalmente tenemos:

F_0 está en concordancia con la frecuencia programada del sistema, como distinción del valor actual del programa (F'_{0m}).

θ_{0m} es cualquier error o compensación intencional en el programa de frecuencia del sistema en el área M, tal que:

$$F'_{0m} = F_0 + \theta_{0m} \quad \dots \text{II.2.5}$$

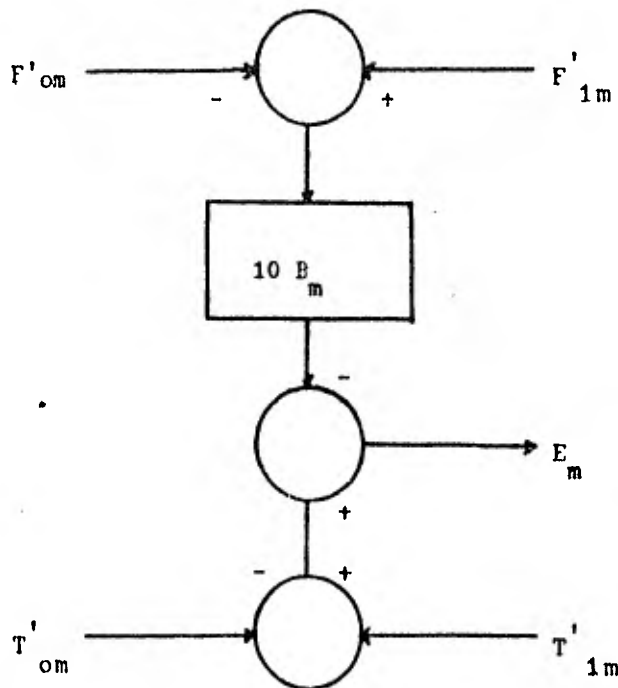


Figura II.2.1.

Substituyendo las ecuaciones II.6 a II.9 inclusive en la ecuación II.2.1 se obtiene:

$$E_m = (T_{1m} + \tau_{1m} - T_{om} - \tau_{om}) - 10B_m (F_1 + \phi_{1m} - F_o - \phi_{om}) \quad \dots \text{II.2.6}$$

En la ecuación II.10 el valor del intercambio neto real y la frecuencia programada son usadas junto con cualquier correspondiente error o compensación en medición o valorización en los parámetros que prevalecen en el área. Un diagrama esquemático para el cálculo computacional del control de error basado en la ecuación II.2.6 es mostrado en la figura II.2.2.

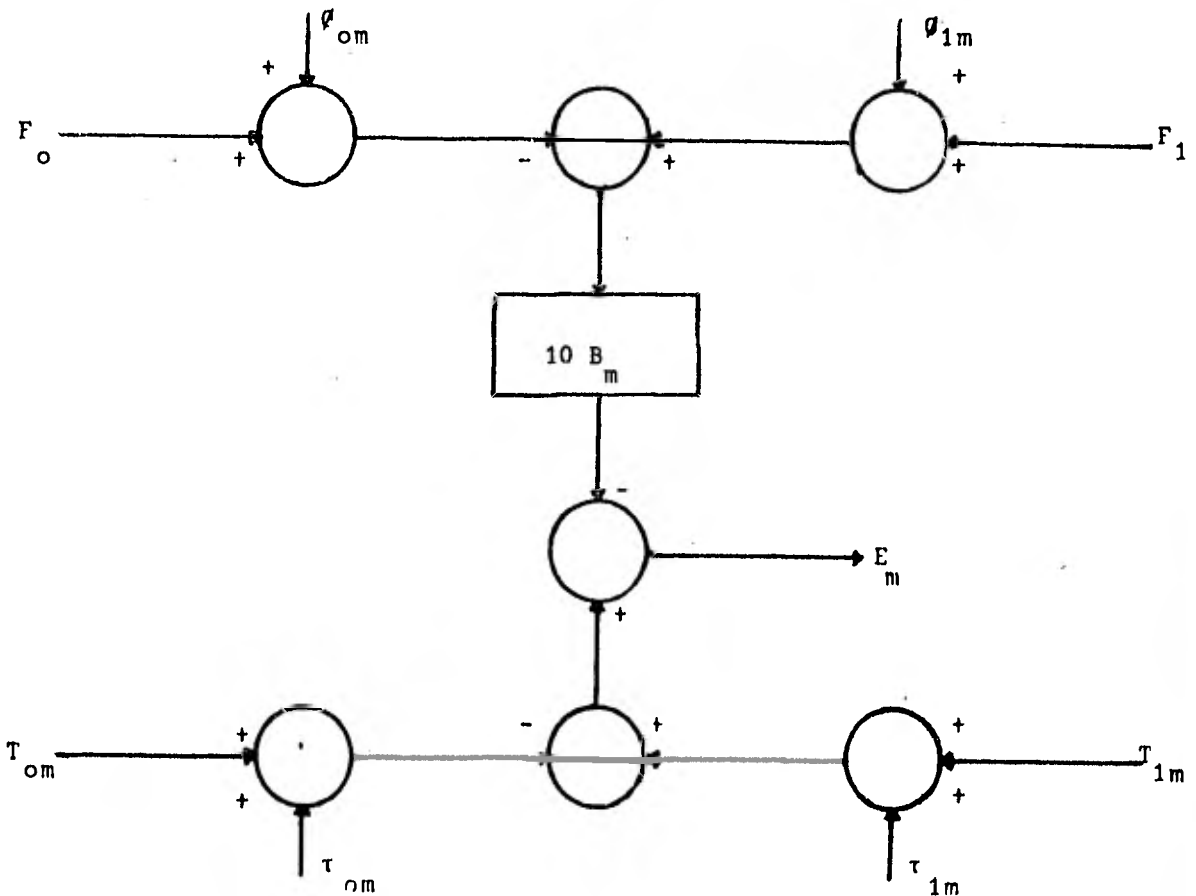


Figura II.2.2

Como siguiente paso para facilitar el examen de la influencia del error y correcciones en las condiciones del área del sistema hagamos las dos τ y las dos θ de la ecuación II.2.6 que se combinen, tal que:

$$\tau_m = \tau_{om} - \tau_{1m} \quad \dots \text{II.2.7}$$

y

$$\theta_m = \theta_{om} - \theta_{1m} \quad \dots \text{II.2.8}$$

Substituyendo en la ec. II.2.6 las ecs. II.2.7 y II.2.8 tenemos:

$$E_m = (T_{1m} - T_{om} - \tau_m) - 10B_m (F_1 - F_0 - \theta_m) \quad \dots \text{II.2.9}$$

La figura II.2.3 es un diagrama esquemático del cálculo del error de -- control de área de acuerdo con la Ec. II.2.9.

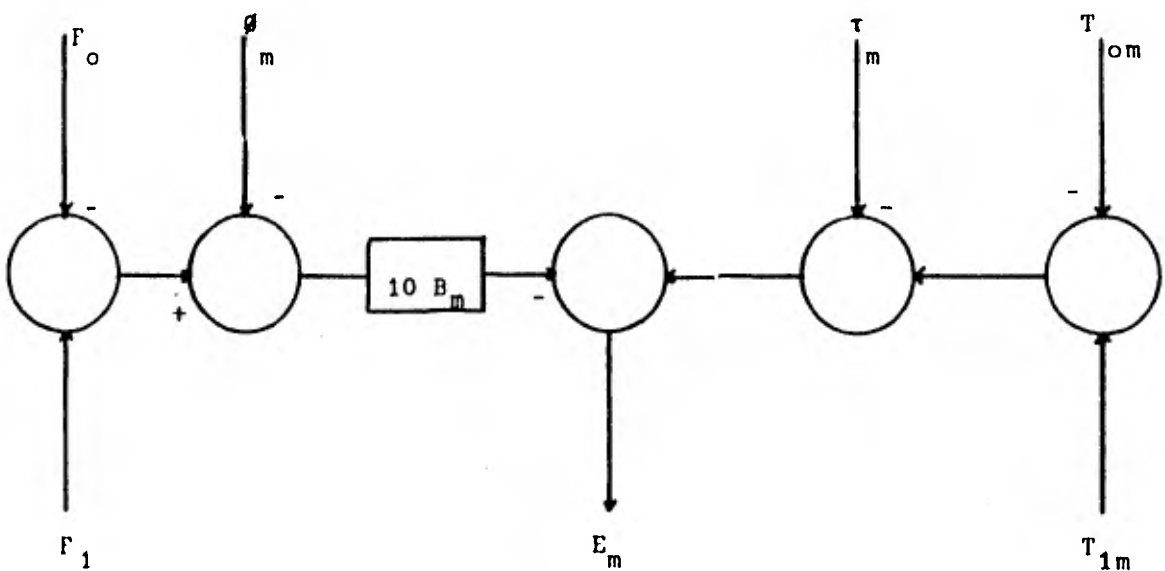


Figura II.2.3

Consideremos ecuaciones similares a la Ec. II.2.9 para todas las áreas de la interconexión,

$$E_a = (T_{1a} - T_{0a} - \tau_a) - 10B_a(F_1 - F_0 - \phi_a) \quad \dots \text{II.2.9a}$$

$$E_b = (T_{1b} - T_{0b} - \tau_b) - 10B_b(F_1 - F_0 - \phi_b) \quad \dots \text{II.2.9b}$$

$$E_n = (T_{1n} - T_{0n} - \tau_n) - 10B_n(F_1 - F_0 - \phi_n) \quad \dots \text{II.2.9n}$$

Sumando las ecuaciones II.2.9a a II.2.9n inclusive obtenemos:

$$\begin{aligned} E_a + E_b \dots + E_n &= (T_{1a} + T_{1b} \dots + T_{1n}) - (T_{0a} + T_{0b} \dots + T_{0n}) \\ &- (\tau_a + \tau_b \dots + \tau_n) - 10(B_a + B_b \dots + B_n)(F_1 - F_0) + (10B_a\phi_a + \\ &10B_b\phi_b \dots + 10B_n\phi_n) \end{aligned} \quad \dots \text{II.2.10}$$

Por definición:

$$(T_{1a} + T_{1b} \dots + T_{1n}) = 0 \quad \dots \text{II.2.10a}$$

y

$$(T_{0a} + T_{0b} \dots + T_{0n}) = 0 \quad \dots \text{II.2.10b}$$

$$F_1 - F_0 = \frac{-(E_a + E_b \dots + E_n) - (\tau_a + \tau_b \dots + \tau_n) +}{10(B_a + B_b \dots + B_n)}$$

$$+ (10B_a\theta_a + 10B_b\theta_b \dots + 10B_n\theta_n) \quad \dots \text{II.2.11}$$

Para cada área hagamos que la relación de sus valores de bias a la suma de valores de bias para la interconexión completa sea designada la relación del tamaño del área e identificada por la letra Y con el correspondiente subíndice del área. Para el área M. por ejemplo:

$$Y_m = \frac{B_m}{B_a + B_b \dots + B_n}$$

Introduciendo Y_a, Y_b, \dots, Y_n en la Ec. II.15 obtenemos:

$$F_1 - F_0 = \frac{-(E_a + E_b \dots + E_n) - (\tau_a + \tau_b \dots + \tau_n)}{10(B_a + B_b \dots + B_n)} + (Y_a\theta_a + Y_b\theta_b \dots + Y_n\theta_n)$$

...II.2.12

Influencia de los factores E, τ y θ .

La ecuación II.2.12 define la influencia en la frecuencia del sistema - de estos factores:

a) Una regulación ineficaz, por ejemplo los errores de control de área, E, no son todos reducidos a cero.

b) De errores o compensaciones en la medición del intercambio neto o valor programado, por ejemplo, de cualquier factor τ que esté presente.

c) De errores o compensaciones en la medición de la frecuencia del sistema o valores programados. por ejemplo, de algunos factores θ que esten presentes.

Substituyendo la Ec. II.2.12 por $(F_1 - F_0)$ en la Ec. II.2.9 quedará:

$$T_{1m} - T_{0m} = E_m - Y_m (E_a + E_b \dots + E_n) + \tau_m - Y_m (\tau_a + \tau_b \dots + \tau_n) \\ - 10B_m \theta_m + 10B_m (Y_a \theta_a + Y_b \theta_b \dots + Y_n \theta_n) \dots \text{II.2.13}$$

La Ec. II.2.13 define la influencia en los intercambios netos de un área cuando existen errores de regulación o se presentan los factores τ y θ en su propia área o en otras áreas de la interconexión.

Un número de formas simplificadas de las Ecs. II.2.12 y II.2.13 pueden fácilmente ser escritas para demostrar la influencia de un error E único o un factor único τ ó θ en un área individual sobre la frecuencia del sistema y sobre el intercambio neto para esa misma área (área M o para un área remota N).

Relaciones tales como las derivadas para las Esc. II.2.12 y II.2.13 se muestran a continuación:

1) Un solo error E en el área M, sin errores E en las demás, ni tampoco factores τ ó θ en cualquier parte del sistema.

$$F_1 - F_0 = - \frac{E_m}{10(B_a + B_b \dots + B_n)} \dots \text{II.2.12a}$$

$$T_{1m} - T_{0m} = (1 - Y_m) E_m \dots \text{II.2.13a}$$

$$T_{1n} - T_{0n} = - (Y_n) E_M \dots \text{II.2.13b}$$

2) Un error o compensación τ solamente en el área M. sin factores τ en algún otro lado, ni tampoco errores E o factores θ en cualquier parte del sistema.

$$F_1 - F_0 = - \frac{I_m}{10(B_a + B_b \dots B_n)} \quad \dots \text{II.2.12b}$$

$$T_{1m} - T_{om} = (1 - Y_m) \tau_m \quad \dots \text{II.2.13c}$$

$$T_{1n} - T_{on} = (Y_n) \tau_m \quad \dots \text{II.2.12d}$$

3) Un error o compensación \emptyset solo en el área M, sin factores \emptyset en algún otro lado, ni tampoco errores E ó factores τ en cualquier parte del sistema.

$$F_1 - F_0 = Y_m \emptyset_m \quad \dots \text{II.2.12c}$$

$$T_{1m} - T_{om} = - 10B_m (1 - Y_m) \emptyset_m \quad \dots \text{II.2.13e}$$

$$T_{1n} - T_{on} = 10B_n (Y_m \emptyset_m) \quad \dots \text{II.2.13f}$$

En resúmen, en lo que respecta al efecto de los errores de frecuencia - del sistema o compensaciones se notará que:

- De las Ecs. II.2.12d y II.2.12b un error E individual o un factor τ - causará una desviación en la frecuencia del sistema igual a la relación del error- E o el factor τ a la adición de valores del bias del sistema en MHz/Hz.

- De la Ec. II.2.12c, un factor individual \emptyset causará una desviación de- frecuencia en proporción a la respectiva relación de tamaño del área.

Con respecto a la influencia en el intercambio neto, se observará que:

- De las Esc. II.2.13a y II.2.13c, un error individual E o un factor -- τ dentro del área, causará una desviación en el intercambio neto para esa área, -- igual a producto del error E o factor τ por la relación del tamaño del resto de - la interconexión.

- De las Ecs. II.2.13b y II.2.13d, un error individual E o un factor --

τ en una área local, causará una desviación en el intercambio neto en cada área remota de la interconexión igual al producto del error local E o factor τ por la relación del tamaño del área remota.

- De la Ec. II.2.13e un factor individual θ en un área, causará una desviación en el intercambio neto para esa área igual al producto del factor θ por el valor del bias del área en MN/Hz por la relación del tamaño del resto de la interconexión.

- De la Ec. II.2.13f, un factor θ individual en una área local causará una desviación en el intercambio neto en cada área remota de la interconexión, igual al producto del factor θ del área local por la relación de tamaño de ésta y por el valor del bias del área remota en MN/Hz.

Quando existen errores E o factores τ ó θ en cierto número de áreas, sus efectos individuales serán acumulativos y el efecto total será de acuerdo a las Ecs. II.2.12 y II.2.13.

Estas ecuaciones pueden ser escritas respectivamente como sigue:

$$F_1 - F_0 = - \sum_{i=a}^n \frac{E_i - \tau_i}{10B_i} - \theta_i Y_i \quad \dots \text{II.2.12d}$$

$$T_{1m} - T_{0m} = \frac{(1-Y_m) (E_m + \tau_m - 10B_m \theta_m)}{-Y_m \sum_{i=a}^n (E_i + \tau_i) + 10B_m \sum_{i \neq a}^n Y_i \theta_i} \quad \dots \text{II.2.13g}$$

$i \neq m$ $i \neq m$

En la Ec. II.2.13g, la línea superior define las causas locales y la inferior las causas remotas de la desviación del programa en el intercambio neto de un área, en este caso el área M.

II.3 ERROR DE TIEMPO E INTERCAMBIO INADVERTIDO.

Un parámetro en el cual es usualmente detectado y se busca corregir - - cuando este tiene lugar, es el intercambio inadvertido. Este es la desviación acumulada del intercambio neto de área respecto al programa establecido.

Las desviaciones de la frecuencia programada del sistema definidas por la Ec. II.2.12 resultan en una acumulación del error de tiempo, la cual suponiendo que F_0 es igual a 60Hz, esta dada por:

$$e = \frac{3600}{60} \int_0^t (F_1 - 60) dt \quad \dots \text{II.3.1}$$

en donde:

e = es el error de tiempo acumulado en el sistema en segundos.

t = es la magnitud de tiempo en horas, sobre la cual el error de tiempo se ha acumulado.

Substituyendo la Ec. II.2.12 en la II.3.1 obtenemos:

$$e = 60 \int_0^t \left[\frac{(E_a + E_b \dots + E_n) + (\tau_a + \tau_b \dots + \tau_n)}{10(B_a + B_b \dots + B_n)} + (Y_a \theta_a + Y_b \theta_b \dots + Y_n \theta_n) \right] dt \quad \dots \text{II.3.2}$$

$$e = 60 \int_0^t \frac{E_a dt + \int_0^t E_b dt \dots + \int_0^t E_n dt + \int_0^t \tau_a dt + \int_0^t \tau_b dt \dots + \int_0^t \tau_n dt}{-10 (B_a + B_b \dots + B_n)} + Y_a \int_0^t \theta_a dt + Y_b \int_0^t \theta_b dt \dots + Y_n \int_0^t \theta_n dt \dots \text{II.3.2a}$$

La Ec. II.3.2a, puede también ser escrita como:

$$e = -6 \sum_{i=a}^n \frac{1}{B_i} \left(\int_0^t E_i dt + \int_0^t \tau_i dt - 10B_i \int_0^t Y_i \theta_i dt \right) \dots \text{II.3.2b}$$

Similarmente, las desviaciones del intercambio neto programado de acuerdo a la Ec. II.2.13 causará una acumulación de intercambio inadvertido, designado I_m para el área M y definido en MM - hr sobre un espacio de tiempo de 3 horas, como sigue:

$$I_m = \int_0^t (T_{1m} - T_{om}) dt \dots \text{II.3.3}$$

Substituyendo la Ec. II.2.13 en la Ec. II.3.3, tendremos:

$$I_m = \int_0^t E_m dt - Y_m (E_a + E_b \dots + E_n) + \tau_m - Y_m (\tau_a + \tau_b \dots + \tau_n) - 10B_m \theta_m + 10B_m (Y_a \theta_a + Y_b \theta_b \dots + Y_n \theta_n) dt \dots \text{II.3.4.}$$

$$I_m = \int_0^t E_m dt - Y_m \left(\int_0^t E_a dt + \int_0^t E_b dt \dots + \int_0^t E_n dt \right) + \int_0^t \tau_m dt - Y_m \left(\int_0^t \tau_a dt + \int_0^t \tau_b dt \dots + \int_0^t \tau_n dt \right) - 10B_m \left(\int_0^t \theta_m dt - Y_a \int_0^t \theta_a dt - \right.$$

$$- Y_b \int_0^t \delta_b dt \dots - Y_n \int_0^t \delta_n dt) \quad \dots \text{II.3.4a}$$

La Ec. II.3.4a puede también escribirse como:

$$I_m = (1 - Y_m) \left(\int_0^t E_m dt + \int_0^t \tau_m dt - 10B_m \int_0^t \delta_m dt \right) - Y_m \sum_{i \neq a}^n \left(\int_0^t E_i dt + \int_0^t \tau_i dt + 10B_m \sum_{i \neq a}^n Y_i \int_0^t \delta_i dt \right) \quad \dots \text{II.3.4b}$$

En la Ec. II.3.4b, la línea superior define las causas locales y la inferior las causas remotas de la acumulación de intercambio inadvertido en un área, - en este caso el área M.

Es obvio de las Ecs. II.3.2a ó II.3.2b y II.3.4a ó II.3.4b como y hasta donde el error de tiempo del sistema y la acumulación del intercambio inadvertido del área se desarrolla debido a: una regulación defectuosa en cualquier parte del sistema; errores en el intercambio neto o medición de frecuencia en cualquier parte del sistema; errores o compensaciones no coordinadas en los valores del intercambio neto o en los programas de frecuencia del sistema en cualquier lugar de éste.

Las relaciones entre intercambio inadvertido y error de tiempo del sistema sin errores E , τ , ó δ pueden encontrarse aplicando:

$$(T'_{1m} - T'_{0m}) = 10B_m (F'_{1m} - F'_{0m}) \quad \dots \text{II.3.5}$$

La integral de tiempo del término de la izquierda de la ecuación anterior, es el intercambio inadvertido y será designado como I_m y expresado en MW-hr. La integral de tiempo del lado derecho es $10B_m (F'_{1m} - F'_{om})$ ha persistido.

Esto es:

$$I_m = 10 (F'_{1m} - F'_{om}) h \quad \dots \text{II.3.6}$$

Para un sistema a 60Hz, el error de tiempo t , en segundos que tiene lugar para una desviación de frecuencia $(F'_{1m} - F'_{om})$ en un tiempo h es igual a:

$$t = 60 (F_1 - F_0) h \quad \dots \text{II.3.7}$$

Así; el intercambio neto inadvertido para un área operando con error de control cero será igual a:

$$I_m = \frac{B_m (e)}{6} \quad \dots \text{II.3.8}$$

Por lo que podemos decir, que para un área que tiene regulado a cero su error de control, el intercambio inadvertido está constituido totalmente por el -- que se deriva del uso del bias de frecuencia y es igual a una sexta parte del producto del bias y el error de tiempo del sistema.

Sumando los intercambios inadvertidos I_m para todas las áreas interconectadas que mantienen un error de control de área cero durante el período de desviación de frecuencia que crea el error de tiempo t , se tiene como resultado:

$$I_m = \frac{(\Sigma B)(t)}{6} \quad \dots \text{II.3.9}$$

Para establecer las relaciones generales cuando E y los factores τ y \emptyset se presentan en el área, integramos todos los términos de la Ec. II.2.9 y hacemos las substituciones adecuadas de las Ecs. II.3.1 y II.3.3 obteniendo:

$$\int_0^t E_m dt = I_m - \int_0^t \tau_m dt - \frac{10B_m}{60} (e) + 10B_m \int_0^t \emptyset_m dt$$

la cual reagrupada viene a ser:

$$I_m = \int_0^t E_m dt + \int_0^t \tau_m dt - 10B_m \int_0^t \emptyset_m dt + \frac{B_m}{6} (e) \quad \dots \text{II.3.4c}$$

La Ec. II.2.4c relaciona la acumulación de intercambio inadvertido de un área a la acumulación de error de tiempo que ocurre en el sistema y al E , y factores τ y \emptyset dentro del área.

Es de esperarse que las áreas individualmente hagan todos los esfuerzos razonables para minimizar el error de tiempo y la acumulación del intercambio inadvertido por la minimización o eliminación de las fuentes que lo causan. Sin embargo, las acumulaciones ocurrirán y será necesario corregirlas. Tales correcciones se lograrán haciendo las compensaciones apropiadas en los programas de frecuencia del sistema para corregir las acumulaciones de error de tiempo y compensaciones en los programas de intercambio neto para corregir las acumulaciones de intercambio inadvertido.

Los postulados a seguir son:

1.- Compensaciones hechas en el programa de frecuencia para corrección del error de tiempo no deben crear preferentemente desviaciones de los programas de intercambio neto.

2.- Compensaciones hechas en los programas de intercambio neto del área para corrección de intercambio neto inadvertido deben preferentemente, no causar desviaciones del programa de frecuencia del sistema, ni desviaciones indeseables de programas de intercambio neto en cualquier otra parte del área.

¿Cómo lograr estos objetivos? Las Ecs. II.2.12 y II.2.13 nos sugieren una manera de hacerlo elaborando enseguida un análisis de ello.

II.4 CORRECCION DE ERROR DE TIEMPO.

Consideremos que los términos \emptyset en las Ecs. II.3.2 y II.3.3 representan las compensaciones intencionales de frecuencia programada en las respectivas áreas del sistema y que todas ellas utilizan la misma compensación.

El último término del paréntesis de la Ec. II.2.12 ahora está dado como $(Y_a + Y_b \dots + Y_n) \emptyset$, el cual debido a que $(Y_a + Y_b \dots + Y_n) = 1$, es entonces igual a \emptyset . Por lo tanto se puede ver que el efecto de aplicar tal compensación intencional común en el sistema es causar una desviación de frecuencia de magnitud \emptyset .

En lo que respecta a la desviación del intercambio neto según se define por la Ec. II.2.13 los dos últimos términos vienen a ser $-10B_m \emptyset + 10B_m (Y_a + Y_b \dots + Y_n) \emptyset$, lo cual se reduce a cero.

Entonces una compensación común del sistema en el programa de frecuencia introducirá una desviación en la frecuencia del sistema igual a la propia compensación común y no causará desviaciones en los flujos de intercambio neto. Esto desde luego no es sorprendente ya que simplemente confirma la práctica que ha sido usual por varios años en las interconexiones. Compensaciones unilaterales en el programa de frecuencia deberán ser suprimidas, ya que ellas causaran desviaciones en la interconexión como es planteado por la Ecs. II.2.13e y II.2.13f.

Similarmente las compensaciones desiguales del programa de frecuencia deberán ser evitadas. La compensación del programa de frecuencia deberá ser la misma en todas las áreas y debe ser proporcional a la acumulación de error de tiempo del sistema y de signo algebraico opuesto. Se puede escribir para cada área de un sistema a 60 Hz como:

$$be = 60 \int_0^t b (F_1 - 60) dt \quad \dots \text{II.4.1}$$

donde:

b es el valor del error de tiempo del bias en Hz/seg de error de tiempo y es supuesto como de signo negativo.

El segundo término del paréntesis de las ecuaciones del E (Ec. II.2.9 a II.2.9n) puede ahora ser desarrollado para incluir la compensación común de la corrección de error de tiempo de la Ec. II.4.1, donde por ejemplo para el área M:

$$E_m = (T_{1m} - T_{0m} - \tau_m) - 10B_m (F_1 - F_0 - \theta_m - be) \quad \dots \text{II.4.2}$$

La parte superior de la figura II.5.1 muestra la suma de esta compensación de la corrección de error de tiempo. El asterisco en la figura es incluido -

para sugerir la práctica prevaleciente de introducir sobre una base a lo largo del sistema, por ajuste manual en las áreas individuales, el término de compensación común periódicamente, sobre instrucciones del área central de signada para conservar la responsabilidad del tiempo del sistema. Por supuesto sería ventajoso si -- los datos del error de tiempo del sistema se encontrarán continuamente disponibles en todas las áreas y éstos comparados contra el tiempo oficial nacional. Esto permitirá continuidad. coordinando la comparación de magnitud de la corrección de -- error de tiempo automático en todas las áreas, por la Ec. II.4.2, eliminando la -- necesidad presente de comunicación a lo ancho del sistema para iniciar o parar los períodos de corrección de tiempo. Tal práctica además de corregir la acumulación de error de tiempo, minimizará la acumulación de intercambio inadvertido que se -- deriva de los errores \emptyset .

Esto podrá ser aún más ventajoso si el término completo ($F_1 - F_0 - be$) fuera transmitido continuamente de una central a todas las áreas de control de la interconexión, eliminando así errores \emptyset ó compensaciones y proveyendo una base -- realmente coordinada y común para las respuestas del bias del área, regulación de frecuencia del sistema y correcciones automáticas para cualquier acumulación de -- error de tiempo que ocurra. Un retroceso local sería requerido para períodos de -- interrupción de señales comunes de comunicación.

II.5 CORRECCION DE INTERCAMBIO INADVERTIDO.

Consideremos ahora que los términos τ en las Ecs. II.2.12 y II.2.13 representan compensaciones intencionales en programas de intercambio neto del área -- para la corrección de acumulaciones de intercambio inadvertido del área.

Volviendo primeramente a la Ec. II.2.13 se podrá observar que si la su-

ma algebraica de todas las compensaciones τ para la interconexión como un total fuera igual a cero, y si todas las áreas fueran reguladas efectivamente para reducir su respectivo E a cero, entonces las compensaciones τ en cada área causarían -- una desviación de intercambio neto en cada área, igual a la magnitud de su propia compensación τ . Así mismo en lo que respecta a la desviación de frecuencia que -- está definida por la Ec. II.2.12 para las condiciones establecidas, los terminos τ , serán algebraicamente cero, saliendo de la ecuación y no causando desviación en la frecuencia del sistema.

La cuestión es entonces, si las compensaciones en los programas de intercambio pueden arreglarse para que su suma algebraica sea cero.

En la práctica, dos áreas que encuentren, al comunicarse entre si, que tienen acumulaciones de intercambio inadvertido en direcciones opuestas, pueden coincidir en compensaciones de programas de intercambio neto bilateral iguales pero -- opuestas, con lo cual reduzcan sus acumulaciones respectivas sin trastornar la -- frecuencia del sistema y sin causar desviaciones en los flujos de intercambio neto de otras áreas. También será obvio de las Ecs. II.2.12b, II.2.13c y II.2.13d que una compensación del programa de intercambio neto unilateral de un área, contribuirá a la reducción de acumulación de intercambio inadvertido para esa área, o para cualquier área que tenga acumulaciones en dirección opuesta y sumará las acumulaciones en las áreas que en ese tiempo no tuvieran ninguna o tuvieran algunas en la misma dirección.

Cuando se tiene redes muy grandes, que comprenden un gran número de -- áreas, es posible que periódicamente encontremos una que al afectar la compensación de un programa bilateral, la corrección del intercambio inadvertido sería compleja

Una alternativa posible es el insertar compensaciones del intercambio neto programado simultaneamente en todas las áreas de control de interconexión a tiempos estipulados y en relación acordada perviamente a la acumulación de intercambio inadvertido en cada área. Esta alternativa será ahora analizada más a fondo, primero para el caso donde la suma algebraica de la mencionada compensación τ sea cero y después para el caso en que esta condición no se aplique.

Específicamente el cálculo del error de control de área, para cada área de la interconexión será aumentado para incluir la compensación de intercambio neto programado relacionado a su intercambio inadvertido. Para una área M por ejemplo, la Ec. II.2.9. quedará:

$$E_m = (T_{1m} - T_{0m} - \tau_m + K1_m) - 10B_m (F_1 - F_0 - \phi_m) \quad \dots II.5.1$$

Donde:

I_m es la acumulación del intercambio neto inadvertido en el área M, en MW-hr.

K es una constante común a todas las áreas.

II.5.1 Suma algebraica de acumulación de intercambio inadvertido igual a cero.

Suponiendo que el caso es aquel en el que la suma algebraica de todas las acumulaciones de intercambio inadvertido es igual a cero y si todas las áreas simultaneamente introducen compensaciones K1 de acuerdo con la Ec. II.5.1 con toda las áreas regulando efectivamente a reducir su error de control de área a cero, será claro de las Ecs. II.2.12 y II.2.13 que no habrá desviaciones de frecuencia -- causadas por las compensaciones K1 y cada área tendrá una desviación del intercambio neto programado igual a su propia compensación K1. Entonces la corrección --

coordinada de acumulaciones de intercambio inadvertido será lograda a través de toda la interconexión.

Las acumulaciones de intercambio inadvertido son en general periódicamente calculadas del wattorímetro usualmente separado de los telémetros de la línea de interconexión usados para el control. Si por ejemplo, las lecturas respectivas del wattorímetro se toman cada hora en todas las áreas, una técnica sería compensar en todas las áreas el valor de intercambio neto programado durante un tiempo específico después de cada hora: haciendo K igual a $1/H$, donde H común a todas las áreas e igual al tiempo en horas durante el cual las acumulaciones de intercambio inadvertido serán corregidas, la Ec. II.5.1 será entonces:

$$E_m = (T_{1m} - T_{0m} - \tau_m + \frac{I_m}{H}) - 10B_m (F_1 - F_0 - \phi_m) \quad \dots II.5.2$$

El H común será seleccionado tal que la corrección de acumulaciones de intercambio inadvertido sea lo suficientemente rápida para corregir los errores normales de regulación o los errores ϕ ó τ , pero suficientemente lenta para permitir la contribución de emergencia del bias de frecuencia al área en la cual persiste la necesidad.

La parte inferior de la figura II.5.1 ilustra tal sistema con corrección automática para acumulación de intercambio inadvertido por la introducción de compensaciones I/H . Nuevamente, el asterisco de la figura II.5.1 sugiere que la compensación puede ser hecha en forma periódica manualmente, pero en un programa de tiempo uniforme a través de las interconexión.

II.5.2 Suma algebraica de acumulación del intercambio inadvertido diferente de cero.

Si por alguna razón como por ejemplo un error humano, existe un intercambio inadvertido inexplicable alrededor de la interconexión, que clase de resultado producirá por la introducción del factor de corrección I/H. Primero se analizará con un control efectivo en todas las áreas de acuerdo a la Ec. II.5.2, pero con la suma algebraica del factor I/H diferente de cero. Se tendrán entonces desviaciones indeseables en la frecuencia del sistema, como lo sugiere la Ec. II.2.12.

Esto será evitado si las Ecs. II.4.2 y II.5.2 son en efecto combinadas, tal que los cálculos en el error de control de área, en lo ancho de la base del sistema, incluyan el error de tiempo y los factores de corrección del intercambio inadvertido, teniendo para el área M:

$$E_m = (T_{1m} - T_{0m} - \tau_m + \frac{I_m}{H}) - 10B_m(F_1 - F_0 - \phi_m - be) \quad \dots II.5.3$$

La computación del error de control de área, según la Ec. II.5.3 es ilustrado por la figura II.5.1.

El objetivo principal de la ecuación combinada II.5.3, es el suministrar correcciones coordinadas para la base del sistema, tanto para el error de tiempo como para las acumulaciones del intercambio inadvertido, pero esto adicionalmente ayuda para el logro de una normalización en la frecuencia del sistema. por la creación y mantenimiento de un contrabalance sostenido de error de tiempo, donde este es despreciado para el intercambio inadvertido.

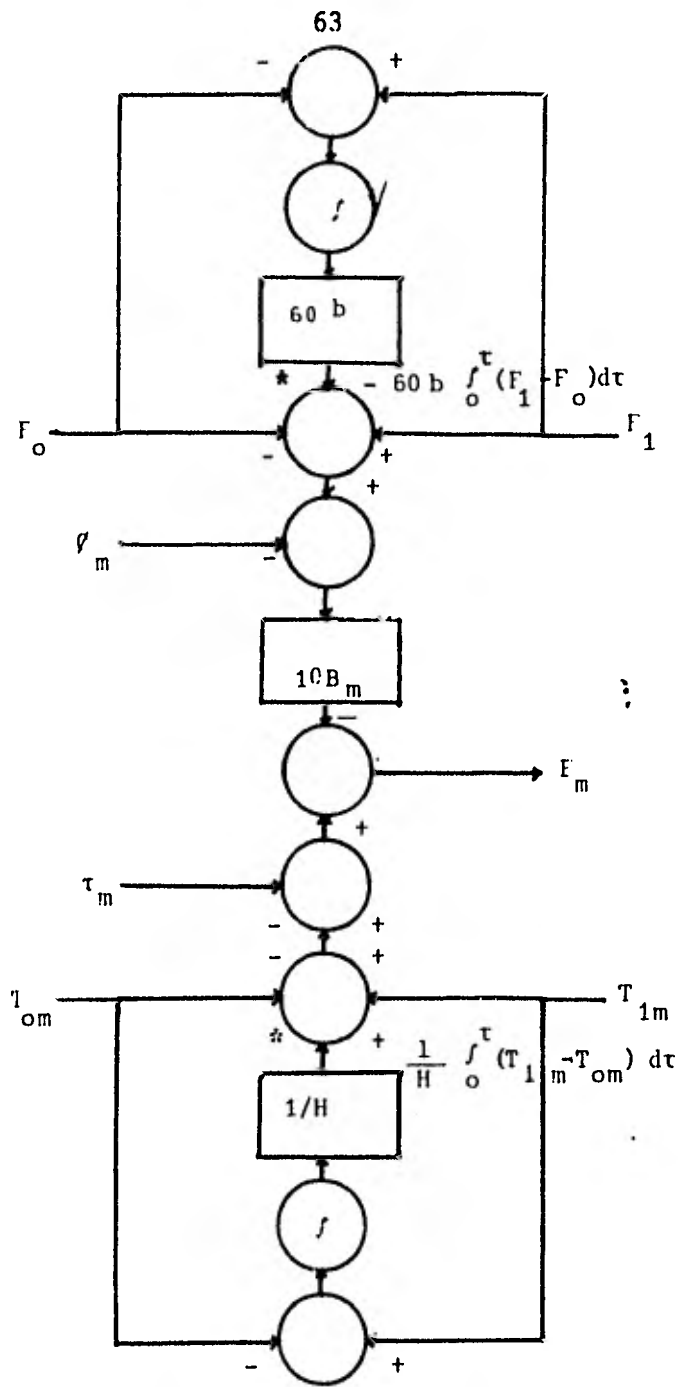


Figura II.5.1

Esto puede ser ilustrado y la magnitud del error de tiempo sostenido de finido, mediante ecuaciones similares a la Ec. II.5.3 para todas las áreas y sumando las obtendremos:

$$\begin{aligned}
 E_a + E_b \dots + E_n &= (T_{1a} + T_{1b} \dots + T_{1n}) - (T_{0a} + T_{0b} \dots + T_{0n}) - (\tau_a + \tau_b \dots + \tau_n) \\
 &+ \left(\frac{I_a + I_b \dots + I_n}{H} \right) - 10 (B_a + B_b \dots + B_n) (F_1 - F_0 - be) + \\
 &+ 10 (B_a \theta_a + B_b \theta_b \dots + B_n \theta_n) \quad \dots \text{II.5.4}
 \end{aligned}$$

Recordando que por definición los dos primeros términos entre paréntesis del lado derecho de la Ec. II.3.9 son cero, entonces, cuando todas las áreas regulan efectivamente y reducen su error de control de área a cero, resulta que:

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{I_a + I_b \dots + I_n}{H} \right) - (\tau_a + \tau_b \dots + \tau_n) &= 10 (B_a + B_b \dots + B_n) (F_1 - F_0 - be) - \\
 &- 10 (B_a \theta_a + B_b \theta_b \dots + B_n \theta_n) \quad \dots \text{II.5.5}
 \end{aligned}$$

Si no existen errores τ o θ o de compensación, la ecuación anterior resulta en:

$$\frac{I_a + I_b \dots + I_n}{H} = 10 (B_a + B_b \dots + B_n) (F_1 - F_0 - be) \quad \dots \text{II.5.6}$$

El valor necesario de e para que a una frecuencia F_0 de 60 Hz, la diferencia $F_1 - F_0$ sea igual a cero, es decir regresemos al valor de 60Hz, lo obtendremos

mos de la Ec. II.5.1

$$e = - \frac{(I_a + I_b + I_n)}{10 (B_a + B_b \dots + B_n) (H) (b)} \quad \dots \text{II.5.7}$$

Con un control efectivo en todas las áreas, de acuerdo con la Ec. II.5.3, la Ec. II.5.7 define el error de tiempo sostenido que debería ser contrabalan-- ceado no tomando en cuenta el intercambio inadvertido y dando una frecuencia de 60 Hz en el sistema si no existieran otros errores τ , \emptyset ó compensaciones en cualquiera de las áreas. El valor de e para lograr tal balance, será el correspondiente a -- las alteraciones que hubiere si errores τ , \emptyset ó compensaciones en cualquiera de las áreas que se presentaran.

Se verá claramente que cuando la suma del intercambio inadvertido alrededor de la interconexión no es cero y que el término de corrección de intercambio inadvertido I/H es usado, entonces el término de corrección de error de tiempo be, necesita también ser utilizado.

Será ahora importante ver, cual es la desviación del intercambio neto - en cada área cuando la suma de acumulaciones de intercambio inadvertido para el -- sistema, como un conjunto, no es cero y la Ec. II.5.3 es usada en todas las áreas.

Continuando con las suposiciones de que no hay otros errores τ , \emptyset ó com pensaciones y que todos los errores de control de área son mantenidos en cero, subs tituiremos la Ec. II.5.7 en la II.5.3 obteniendo así:

$$T_{1m} - T_{0m} = - \frac{I_m}{H} + \frac{10B_m(I_a + I_b \dots + I_n)}{10(B_a + B_b \dots + B_n)H} \quad \dots \text{II.5.8}$$

$$T_{1m} - T_{0m} = -\frac{I_m}{H} + Y_m \frac{(I_a + I_b \dots + I_n)}{H} \quad \dots \text{II.5.9}$$

La Ec. II.5.9 establece para las condiciones citadas, que si la suma algebraica de las acumulaciones de intercambio inadvertido no es cero, será automáticamente asignada a cada área, en suma algebraica a sus compensaciones I/H , una parte del intercambio inadvertido despreciado en proporción al tamaño de la relación del área. Esto aparecería como una localización racional, tal como pueda ser hecha por dicho intercambio inadvertido despreciado.

La asignación a cada área variaría en caso de existir otros errores o compensaciones τ ó β en una o más áreas.

II.6 INTEGRAL DE TIEMPO DEL ERROR DE CONTROL DE AREA.

Es interesante ver el papel que desempeña el error de control de área - acumulado en la corrección del error de tiempo y las acumulaciones de intercambio inadvertido.

Observando las ecuaciones II.2.15a y II.2.17a se notará que si no hubiera errores o compensaciones τ ó β en la interconexión, el error de tiempo del sistema y la acumulación de intercambio inadvertido del área serán funciones únicamente de las integrales de tiempo de los errores de control de área, $(E_a, E_b, \dots E_n)$ alrededor de la interconexión. Esto sugiere que sería ventajosa una técnica de control que causara que las integrales de tiempo de todos los errores de control de área se redujeran respectivamente a cero, para eliminar los errores de tiempo del sistema y las acumulaciones del intercambio neto del área.

En la práctica habría limitaciones a tal técnica, pues es probable que ambos sean errores τ y θ . También es probable que haya interrupciones periódicas en la computación del error de control de área debido a interrupciones telemétricas. Habría incertidumbre concerniente a la magnitud de tiempo sobre el cual las diversas áreas calcularan las integrales de tiempo del error de control de área. Además normalmente habría el deseo de mantener programas de intercambio neto en estado estable sobre períodos de tiempo relativamente cortos y no solamente integrándose sobre largos períodos de tiempo.

II.7 ECUACION PARA USO PRACTICO.

Debido a lo anterior, se prefieren técnicas para la corrección del error de tiempo y las acumulaciones de intercambio que sean de naturaleza universal y dependan de parámetros que estén disponibles en forma regular y confiable. Las compensaciones correctivas incorporadas a la Ec. II.5.3 constituyen tales técnicas. La compensación I/H para la corrección de las acumulaciones de intercambio inadvertido del área estarán disponibles, comparando las lecturas del megawatthorímetro de la línea de interconexión con la integral de tiempo calculada de los programas de intercambio neto del área. La compensación para la corrección del error de tiempo del sistema, τ , estará disponible en forma directa o por la comunicación desde un área de referencia central.

Sin embargo lo que parecería ser una limitación en la Ec. II.5.3 es que incluye otros parámetros, tales como errores τ_m ó θ_m que no están directamente disponibles para su aplicación.

La Ec. II.5.3 ha demostrado su propósito ilustrativo, pero una varia-

ción práctica de una ecuación del error de control de área, incluyendo los factores de corrección I/H y b_e , basándose únicamente en parámetros que pueden medirse o establecerse, apliquemos las ecs. II.2.2, II.2.3, II.2.4, II.2.5, II.2.7, II.2.8 a la Ec. II.5.3 y obtendremos:

$$E_m = (T'_{1m} - T'_{0m} + \frac{I_m}{H}) - 10B_m (F'_{1m} - F'_{0m} - b_e) \quad \dots \text{II.7.1}$$

En la figura II.5.2 ilustra el cálculo del error de control de área de acuerdo a esta ecuación. Ello sugiere que tal cálculo en todas las áreas de control de un sistema interconectado, con sistemas de control apropiados para reducir sus respectivos errores de control de área a cero, proporcionaría una regulación coordinada de las transferencias de potencia, minimizando simultáneamente el error de tiempo sistema y las acumulaciones de intercambio inadvertido del área. Si se diera el caso de que en las diversas áreas existieran errores τ en los parámetros T'_1 y T'_0 , y errores \emptyset en los parámetros F'_1 y F'_0 , habrá correcciones automáticas I/H para intercambio inadvertido y b_e para error de tiempo.

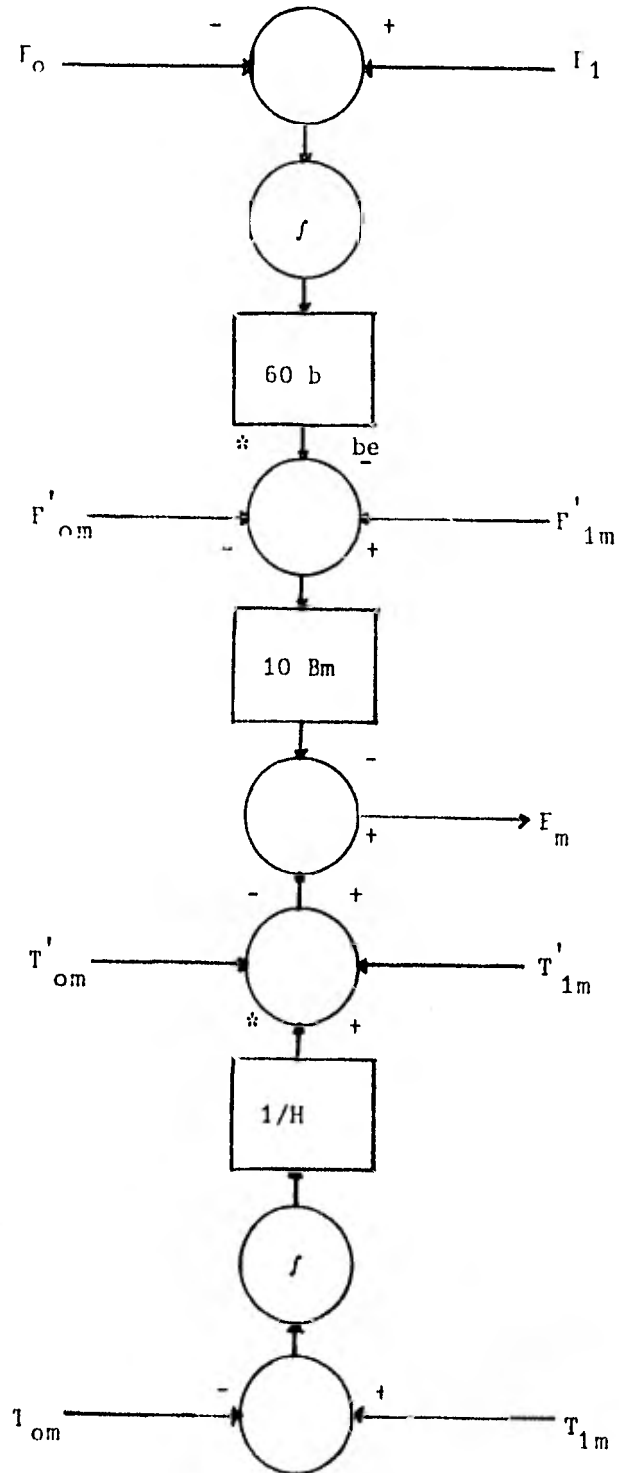


Figura II.5.2

II.8 COMENTARIOS.

De todo lo anterior se desprende la importancia y así se menciona, de la frecuencia como parámetro regidor de criterios, en cuanto a sistemas interconectados se refiere, ya en la primera parte se aprecia la necesidad de contar con un equipo de medición de frecuencia adecuada, si es que se desea suministrar un servicio eficiente, y en la segunda parte, esta necesidad es más evidente pues la frecuencia se convierte en la piedra angular del planteamiento usado; así pues, es claro que en un sistema interconectado se utiliza un control de bias de intercambio neto, los errores de medición de la frecuencia del sistema y también en la medición del intercambio neto; originarán desviaciones de los programas de intercambio y en la frecuencia del sistema, los resultados de una caída de frecuencia pronunciada, pueden alcanzar la calidad de catástrofe en el sistema, pudiendo incluso darse la destrucción del mismo equipo de generación o de transformación; aunque en general si se tiene una interconexión amplia, las desviaciones de la frecuencia pueden ser relativamente pequeñas mientras que las desviaciones ó variaciones del intercambio programado serán mayores en los límites de las áreas en las cuales ocurren los errores.

Las técnicas en general para corregir las desviaciones mencionadas se pueden describir como una compensación programada de intercambio neto del área, relacionada respectivamente a la acumulación de intercambio inadvertido en ella sobre una base de tiempo coordinada, y aunando a esta técnica un procedimiento de corrección de error de tiempo a lo extenso del sistema.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- Techniques for improving the control of bulk power transfer on interconnected systems.
Nathan Cohn, Fellow,
IEEE- Transaction on power apparatus and systems.
Vol. Pas 90 P-2 1971
- 2.- Considerations in the regulation of interconnected areas.
Nathan Cohn.
IEEE- Transaction on power apparatus and aystems.
Vol-Pas 86 No. 12 1967.
- 3.- Electric Energy systems theory: An introduction.
Elgerd OIle I.
USA. Mc Graw Hill Book Co. 1971.
- 4.- Redes electricas: Parte I
Viqueira Landa Jacinto.
Representaciones y servicios de ingenierfa 1973.
- 5.- Redes electricas: Parte II.
Viqueira Landa Jacinto
Representaciones y servicios de ingenierfa. 1973
- 6.- Elements of power systems analysis.
Stevenson Williams D.
Mc. Graw Hill Book Co. 1962.
- 7.- Apuntes de Seminario
Ing. Salvador Cisneros Chávez