



Determinación de diapasones de potencia necesarios para el control de frecuencia en el sistema eléctrico cubano

Lázaro Guerra
Antonio A. Martínez
Héctor S. Llamo
Maikop Pérez

Recibido: Octubre del 2006
Aprobado: Diciembre del 2006

Resumen / Abstract

Basado en un análisis estadístico de una base de datos en tiempo real se propone un procedimiento para determinar los diapasones de potencia activa necesarios para desarrollar un efectivo control de la frecuencia. Palabras clave: Control de la frecuencia

A generalized approach based on statistical analysis of real time data base is proposed to determine the margins of real Power necessary to perform an effective load frequency control.

Key words: Load frequency control

INTRODUCCIÓN

Desarrollar un efectivo control de frecuencia en cualquier sistema eléctrico de potencia (SEP) es una tarea compleja, pues implica conocer los diapasones de potencia necesarios para dicho control, lo que depende de las características de la carga del sistema y de los parámetros de los sistemas de control y de los generadores. En el presente trabajo se pretenden determinar los diapasones de potencia para la regulación de la frecuencia del Sistema Electroenergético Nacional de Cuba (SEN).

CONSIDERACIONES GENERALES

La caracterización de la carga debe comenzar con la comprobación del carácter estacionario de las variaciones de potencia activa en períodos de poca variación de la carga, que permita utilizar modelos de análisis espectral,¹ en el cálculo de las desviaciones

aleatorias y al mismo tiempo considerar, despreciables los transitorios que se produzcan, o sea, la suma de la potencia activa generada en el sistema se corresponde con la potencia sumaria de la carga, ya que las mediciones que se utilizarán para caracterizar la carga del sistema es la potencia generada cada 3 s. Deben determinarse además, las variaciones monótonas de la carga en diferentes horarios del día en distintos períodos del año. Adicionalmente debe conocerse la influencia de las cargas no conformes en el sistema, tales como acerías, sistemas industriales que utilizan grandes convertidores de corriente directa (CD) y corriente alterna (CA), etc. La caracterización de la carga en la actualidad puede permitir la proyección para los próximos años. Si se conoce el pronóstico del gráfico diario de cargas, es posible estimar las máximas variaciones de la carga en períodos de 5 min., para ser cubiertas por las

unidades que efectúan el control secundario de la frecuencia.^{2,3}

DETERMINACIÓN DE DIAPASONES DE POTENCIA PARA EL CONTROL DE FRECUENCIA

Para poder lograr lo anterior es necesario caracterizar la carga para obtener modelos que puedan aplicarse para predecir el comportamiento del sistema en el futuro. Se plantea² que hay dos formas de caracterizar la carga, efectuando mediciones en el sistema o haciendo estudios estadísticos de mediciones ya efectuadas en el sistema por sistemas automáticos de medición; esta segunda variante resulta mejor por su confiabilidad.

La base de datos fue obtenida del sistema Scada que está instalado en el DNC (Despacho Nacional de Cargas) y presenta las siguientes características:

- Efectúa mediciones de las potencias generadas y de la frecuencia cada 3 s.
- Las mediciones son simultáneas en el tiempo.

Esta información se puede considerar confiable para el estudio que se pretende realizar. Se parte de efectuar esta caracterización en invierno y en verano en días en que no hayan existido cortes de energía. Lo anterior fue posible para el período de invierno en el mes de diciembre de 2005, donde se cumplían todas estas condiciones. En el caso del verano se dificultó obtener una base de datos con las condiciones necesarias por la frecuencia de los cortes de energía eléctrica en ese período del año 2005, por lo que en este caso solo fue posible tener la información de 20 días de verano del año 2005.

PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Para realizar este procesamiento se elaboró un software (Prodat) en soporte Matlab 7.0, que permitió importar los datos del Scada en ambiente Excel a ambiente Matlab.

Del programa Prodat se obtienen los siguientes resultados:

- Potencia promedio por hora y cada 5 min., de un intervalo de tiempo predefinido.
- Velocidad de variación de la potencia monótona en megawatt por minuto (MW/min).
- Desviación cuadrática media y máxima de las desviaciones de potencia aleatorias en cada intervalo horario de poca variación de la carga.
- Relación entre la desviación cuadrática media de la potencia y la potencia media de un intervalo de tiempo predefinido.

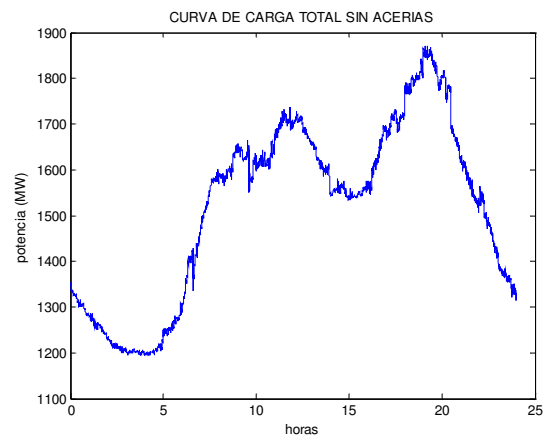
Del procesamiento de la información de los días de verano e invierno antes mencionado se pudieron determinar los períodos de poca y mucha variación de la carga lo cual se muestra en la tabla 1.

En la figura 1 se muestra un gráfico de carga sumaria del SEN obtenido a partir de mediciones de potencia generada en intervalos de 3 s.

El procesamiento matemático de la potencia generada en los períodos de poca variación de la carga para obtener las desviaciones cuadráticas medias y máximas $[\sigma, 3\sigma]$ se muestra en la referencia 2.

TABLA 1
Períodos de poca y mucha variación de la carga del SEN

Períodos de poca variación de la carga (h)	Períodos de mucha variación de la carga (h)
3-5	5-8
14-16	16-19
-----	19-23



Carga sumaria del SEN cubano el 15 de diciembre de 2005.

1

Los pasos analizados fueron los siguientes:

- Cálculo de los coeficientes de autocorrelación de las desviaciones de potencia en cada hora en intervalos de 0 a 15 min., en pasos de 3 s.
- Determinación del espectro de frecuencias de las desviaciones de potencia del sistema.
- Ajuste de los espectros de frecuencia y coeficientes de autocorrelación a curvas continuas.
- Cálculo del área bajo la curva del espectro de frecuencia en el intervalo correspondiente a

oscilaciones entre 0 y 15 min., que se suponen correspondan a oscilaciones aleatorias de la potencia sumaria del sistema.

- Determinación de la desviación cuadrática media de las desviaciones de potencia en cada intervalo horario de poca variación de la carga.

En la referencia 2 se afirma que basándose en cálculos efectuados en la URSS se llegó a una expresión que permite relacionar la desviación cuadrática media de las desviaciones de la carga sumaria del sistema como función de la potencia media del intervalo considerado en el gráfico diario de cargas según la expresión:

$$\Delta P_{aleat} = k \sqrt{P_m}$$

donde:

ΔP_{aleat} : Desviación cuadrática media de las desviaciones de potencia total del sistema.

P_m : Potencia media del intervalo.

y que sobre la base de cálculos efectuados en la URSS, k podía considerarse como 0,4.

Invierno

De los cálculos efectuados en el mes de diciembre de 2005 se obtuvieron los siguientes resultados:

K promedio	Dispersión σ
0,151 8	0,035

Verano

De los cálculos efectuados en 20 días del mes de agosto de 2005 se obtuvieron los siguientes resultados:

K promedio	Dispersión σ
0,125	0,038 1

Aunque los valores de k se obtienen en períodos de poca variación de la carga por las causas explicadas anteriormente son válidas para su uso en cualquier período del gráfico de cargas y pueden a partir de un gráfico de cargas pronosticado del sistema ser utilizadas para obtener variaciones aleatorias de la carga, ya que las únicas limitaciones para su aplicación se relacionan con que las desviaciones de potencia sean estacionarias y cumplan con la ley normal de distribución, lo que fue comprobado para el sistema, en trabajos anteriores.^{2,4}

Estos resultados permiten estimar para un pronóstico determinado del gráfico diario de cargas, los valores máximos de las desviaciones aleatorias de la carga

en períodos de 5 a 15 min., lo que es de gran utilidad en la planificación de la generación para el control de la frecuencia.

ESTUDIO DE LAS VARIACIONES MONÓTONAS DE LA CARGA

Los resultados obtenidos permiten calcular las desviaciones aleatorias de la carga total del sistema respecto a su valor promedio en un intervalo horario cualquiera ya sea de invierno o verano a partir de una curva de carga pronosticada. No obstante, si lo que se desea es conocer las variaciones totales de la carga del sistema en intervalos de tiempo del orden de unos pocos minutos, para planificar diapasones de potencia en el control secundario de la frecuencia,³ es necesario conocer cuáles serían los máximos valores de las variaciones monótonas de la carga en intervalos de 5 min., o sea, de aquellas variaciones de la carga que no dependen de su aleatoriedad sino del momento del día en que se producen. Para ello se muestran los resultados² de medir en el SEN, en 1982, en diferentes intervalos del día correspondientes a rápidas variaciones de la carga, la relación entre la variación máxima de la potencia promedio consumida en cada hora y en intervalos consecutivos de 5 min., en períodos de mucha variación de la carga; concluyéndose que para estos períodos las variaciones monótonas de la carga pueden ser de hasta cuatro veces las máximas variaciones que ocurren en períodos de una hora (en períodos de poca variación de la carga la rapidez de variación en períodos de 5 min., es similar a la media en una hora) y que esta relación era similar en otros sistemas eléctricos de potencia.

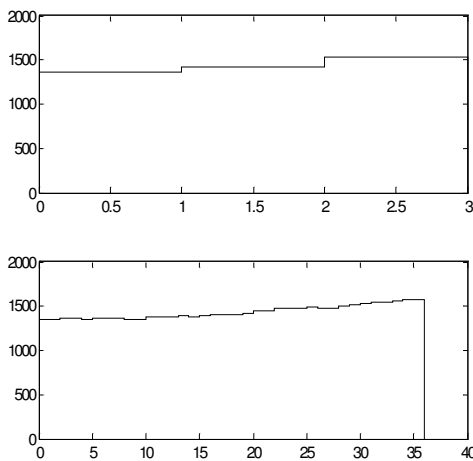
Con el objetivo de comprobar estas aseveraciones se utilizó la misma base de datos de potencia sumaria generada en el SEN en meses de invierno de 2005 y en otros correspondientes al verano del mismo año, para construir en períodos de rápidas variaciones de la carga gráficos promedios de carga, en intervalos de 5 min., y de una hora, para de esta forma estudiar cuál era la máxima relación entre ambas variaciones máximas.

Invierno

En la figura 2 se muestran los gráficos de la carga sumaria promedio del SEN en el intervalo entre las 5 y las 8 a.m. del día 10 de diciembre de 2005, en intervalos horarios y cada 5 min., calculados sobre la base de datos medidos en tiempo real cada 3 s.

Los cálculos anteriores son importantes pues los gráficos diarios de carga dan los valores medios de la carga en un intervalo de una hora pero en realidad

entre una hora y otra, la carga no varía uniformemente, sino que puede hacerlo de manera completamente desordenada y si se desea realizar un control planificado de la frecuencia puede planificarse la entrada en rampa de generación en los períodos de carga pico con el valor promedio de variación de la carga previamente estimados en ese horario, de manera que cualquier desviación respecto a ese valor promedio deberá ser asimilado por aquellos generadores que estén designados para ello, por eso es importante determinar las máximas variaciones monótonas de la carga en intervalos de 5 min., en aquellos períodos en que la carga varía rápido. Esto se hizo en los meses de invierno y verano de 2005. Los resultados de los cálculos efectuados se resumen en las tablas 2 y 3.



Carga sumaria del SEN entre las 5 y las 8 a.m. del día 10 de diciembre de 2005.

2

TABLA 2
Variaciones máximas, medias y mínimas en intervalos de una hora y 5 min., en períodos de mucha variación de la carga en meses de invierno de 2005

Magnitud	5-8 h (MW)	16-19 h (MW)	19-24 h (MW)	5 min/1 h
Pmed1h	133,9	112,58	129,4	3,68
Pmed 5 min	29,49	36,99	35,47	
Pmín1h	61,49	80,15	83,95	3,88
Pmín 5 min	16,32	17,48	15,47	
Pmáx 1h	184,89	172,54	178	3,88
Pmáx 5min	56,72	55,83	56,73	

TABLA 3
Variaciones máximas, medias y mínimas en intervalos de una hora y 5 min., en períodos de mucha variación de la carga en meses de verano de 2005

Magnitud	5-8h (MW)	16-19h (MW)	19-24h (MW)	5min/1h
Pmed1h	99,27	107,82	117,68	2,97
Pmed 5min	26,62	33,26	19,36	
Pmín1h	47,18	88,18	98,66	3,24
Pmín 5min	10,95	19,15	14,05	
Pmáx1h	138,72	162,73	160,23	3,19
Pmáx 5mín	34,43	43,96	43,57	

Verano

De todo lo analizado se concluye que las variaciones de la carga en intervalos de 5 min., tienen dos componentes, una debida a la monotonía del gráfico diario de cargas y la desviación aleatoria propia de la misma dada la gran cantidad de consumidores que existen en el sistema.

Estas dos componentes pueden ser evaluadas en intervalos de 5 min., la segunda en función del valor de la potencia media en el intervalo que se considere según las expresiones antes calculadas de desviación cuadrática media y con una probabilidad muy alta, deben como máximo ser menores que 3 veces la desviación cuadrática media, mientras que las variaciones monótonas si se conoce el gráfico de cargas pueden ser estimadas con valores máximos menores que 4 veces la máxima variación horaria en el intervalo considerado, si el período analizado es de mucha variación de la carga y si es de poca el cuatro de la expresión mostrada a continuación se sustituye por uno, de manera que los diapasones máximos pueden estimarse por la expresión:

$$\Delta P_{máx} = 3(K\sqrt{P_m}) + 4\Delta P_{1máx} / 12 \quad \dots(1)$$

donde:

P_m : Potencia media del intervalo que se considera.

$\Delta P_{máx}$: Máxima variación monótona horaria en el mismo intervalo.

La expresión anterior es válida si no hay entrada planificada de generación en rampa y las unidades que estén trabajando en el sistema tengan que asimilar todas las variaciones de la carga, en caso de que se esté trabajando en períodos de muchas variaciones de la carga es lógico que se planifique la entrada en

rampa de las unidades pico cuya rapidez de entrada o salida debe ser la variación media de la carga monótona en ese intervalo de tiempo, quedando la expresión anterior como:

$$\Delta P_{m\acute{a}x} = 3(K\sqrt{P_m}) + 4\Delta P_{1m\acute{a}x} / 12 \quad \dots(2)$$

$$\Delta P_{5mp}$$

ΔP_{5mp} : Variación de potencia aportada en 5 min., por las plantas que entran en rampa.

El procesamiento estadístico antes expuesto fue aplicado también en el caso en que estuvieran trabajando 70 MW de acerías por arco eléctrico, obteniéndose valores de K superiores (tabla 4), como era de esperar, ya que las siderurgias incrementan las variaciones aleatorias de la carga al mismo tiempo se producen variaciones en los valores promedios de potencia en intervalos de 5 min., con respecto al caso en que se procesa el gráfico de cargas restando la potencias de las acerías. Sin embargo, no se observan variaciones a considerar en los valores medios de la potencia en los intervalos de una hora, lo que se explica por el hecho de que en ese intervalo se producen varios ciclos de fundición que implican saltos de potencia hacia arriba y hacia abajo.

TABLA 4
Valores de K con siderurgias

Régimen	K prom. invierno	K prom. verano
Sin acerías	0,151 8	0,125
Con acerías	0,276 7	0,227 6

En estas condiciones las expresiones (1) y (2) se transforman en:

$$\Delta P_{m\acute{a}x} = 3(0,276 7\sqrt{P_m}) + 4\Delta P_{1m\acute{a}x} / 12 + \Delta P_{5msid} \quad \dots(3)$$

ΔP_{5msid} : Incremento en saltos de potencia en intervalos de 5 min., cuando trabajan siderurgias con respecto a cuando no trabajan.

$$\Delta P_{m\acute{a}x} = 3(K\sqrt{P_m}) + 4\Delta P_{1m\acute{a}x} / 12 + \Delta P_{5msid} - \Delta P_{5mp} \quad \dots(4)$$

Determinación de diapasones de potencia para el control primario de la frecuencia

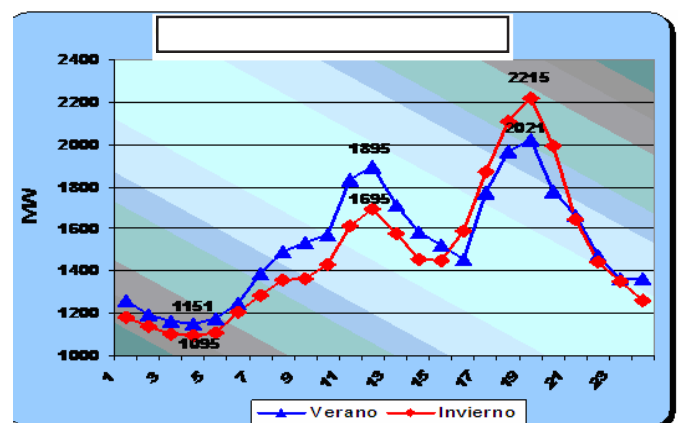
Las variaciones máximas de carga que pueden producirse en el sistema en una decena de segundos tendrán necesariamente que deberse en lo fundamental, a los saltos en los valores de potencia de las siderurgias y son del orden de los valores nominales de las mismas. La peor condición para la regulación sería el salto simultáneo de 70 MW de las

acerías. Si este salto ocurre cuando está ocurriendo una variación máxima de carga aleatoria y monótona en el mismo sentido a este valor habrá que adicionar (suponiendo la variación de la carga uniforme de 5 min., hacia abajo) el valor de la máxima variación aleatoria más monótona en un intervalo del orden de 10 s. Este valor normalmente es muy cercano al salto de potencia de las acerías. El peor momento para que ocurra esta variación es el período de máxima variación de la carga en el mismo sentido que la variación de potencia de la acería, como ya se expresó, por lo que un criterio aceptable sería adicionar al valor, anterior la máxima variación de potencia aleatoria más monótona en 1 min., para dar una reserva adicional de potencia de regulación primaria que permita que esta pueda recuperarse por la acción de la regulación secundaria y evite caídas importantes de la frecuencia. A partir de todos los cálculos efectuados es posible determinar hora por hora para los pronósticos de invierno y verano los diapasones de potencia para la regulación primaria y secundaria de frecuencia, así como la reserva de potencia horaria necesaria para el control de frecuencia.

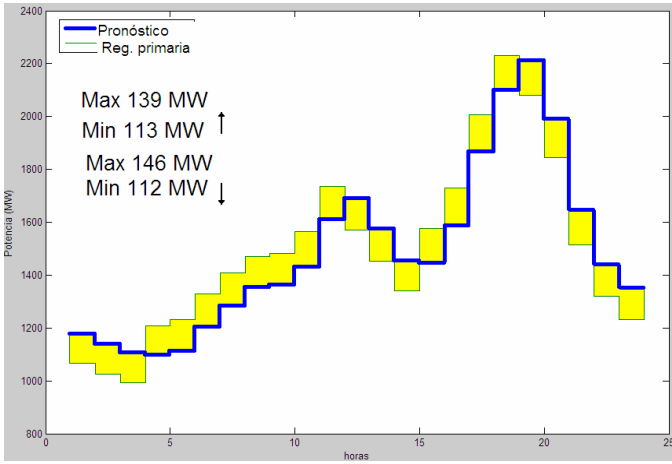
RESULTADOS PRÁCTICOS

En la referencia 5 se presentan tablas con los resultados del procesamiento de los gráficos de carga que se muestran en la figura 3, para períodos de invierno y verano considerando que hay trabajando 100 MW de acerías durante todo el día y sin el trabajo de las acerías. En estas tablas se puede observar la influencia de las acerías en las desviaciones aleatorias de la carga y en los saltos máximos en períodos de 5 min.

A partir de estos resultados es posible obtener los diapasones de potencia hora a hora necesarios para el control de la frecuencia tanto primaria como secundaria según lo observado con anterioridad, resultando para el caso analizado lo mostrado en las figuras de la 4 a la 7, cuando se considera están trabajando 100 MW .de acerías.

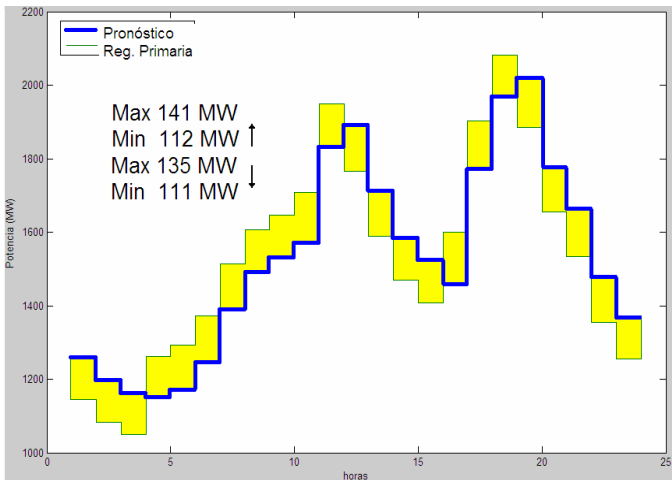


Pronósticos de carga para períodos de invierno y verano.



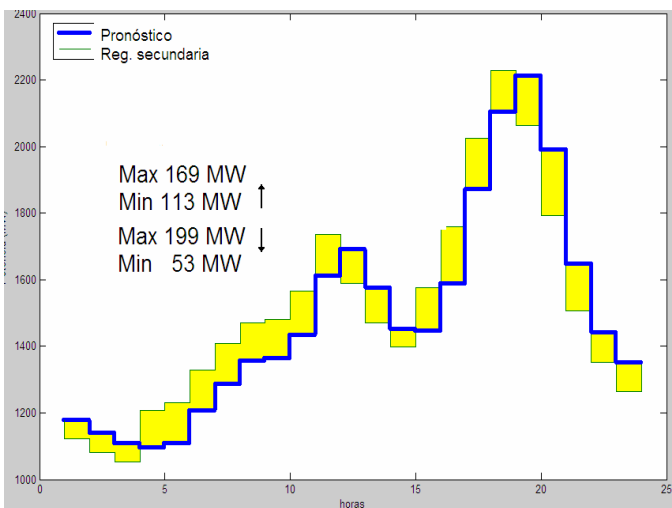
Diapasones para regulación primaria de frecuencia invierno.

4



Diapasones para regulación primaria de frecuencia verano.

5



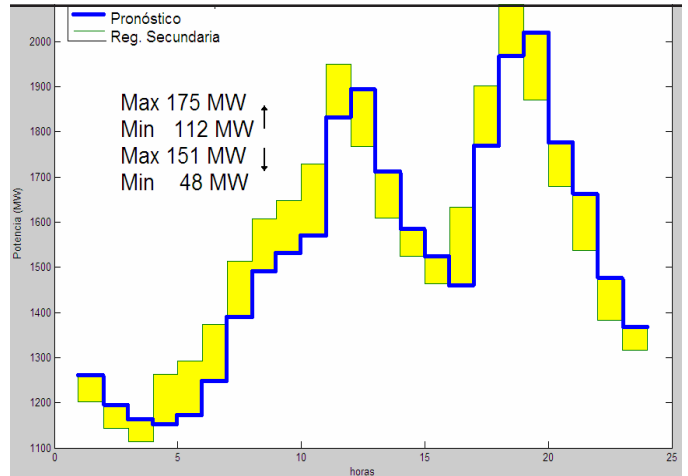
Diapasones para regulación secundaria de frecuencia invierno.

6

En todos los casos se ha considerado que la regulación primaria la efectúan plantas base que retornan de nuevo a sus valores originales después de efectuada la regulación secundaria.

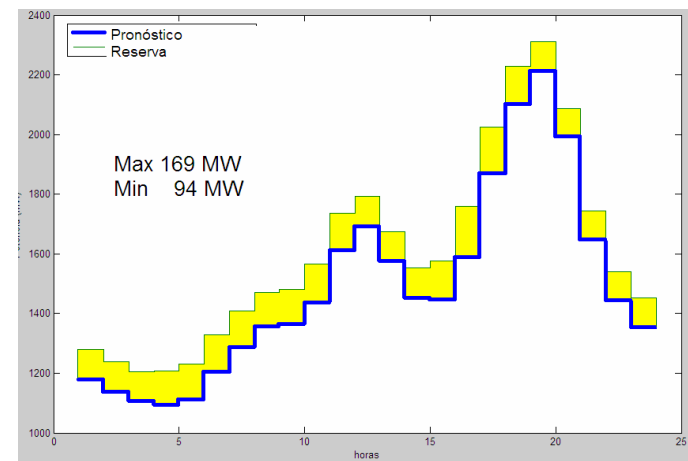
A partir de los resultados anteriores es posible estimar cuál debe ser la reserva de potencia rodante en el sistema para el control de frecuencia, los resultados para los períodos de invierno y verano se muestran en las figuras 8 y 9.

Puede observarse que los valores máximos de reserva tienen lugar en el intervalo horario de mayor variación monótona, y coinciden con los diapasones máximos de regulación secundaria y los mínimos se producen en los períodos de mayor disminución horaria de la carga y son cercanos a un salto de potencia de la aceria en sentido contrario.



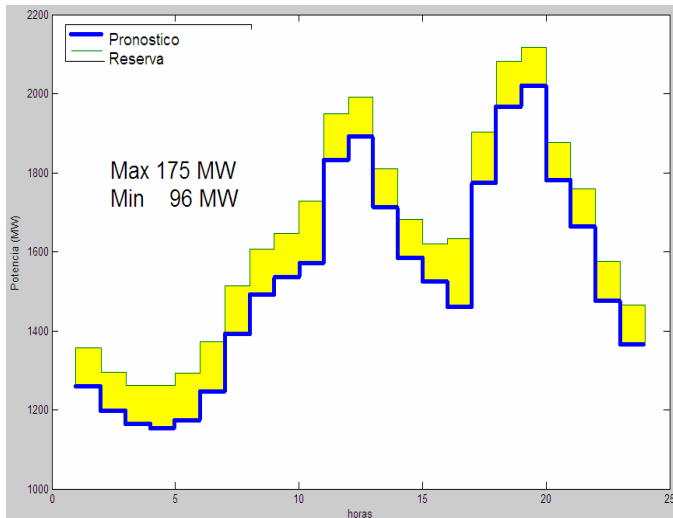
Diapasones para regulación secundaria de frecuencia verano.

7



Reserva para regulación de la frecuencia en invierno.

8



Reserva para la regulación de frecuencia en verano.

9

CONCLUSIONES

El desarrollo del presente trabajo permite tener los diapasones máximos de potencia y reserva necesaria hora a hora para efectuar un correcto control de la frecuencia dado el gráfico horario de cargas del sistema.

A partir de estos resultados y conociendo el estatismo de la carga y el porcentaje de regulación de las unidades generadoras que ejecutarán el control primario, se puede determinar la cantidad de unidades necesarias para que las variaciones de frecuencia se mantengan en valores permitidos.

Valores inferiores a los calculados pueden ser posibles, pero en esos casos es necesario efectuar estudios de la dinámica de la frecuencia en el tiempo para evaluar las máximas variaciones transitorias de esta, los tiempos de recuperación y restringirlos a valores permisibles.⁵

En todos los casos se ha considerado que los saltos de potencia de las acérras ocurren en períodos de 2 s, o sea, prácticamente son instantáneos, la limitación de estos saltos a rampas puede disminuir estos diapasones.

REFERENCIAS

1. Anderson, T. W.: *Análisis estadístico de series temporales*, John Wiley and Sons, Inc, New York, 1971.
2. Informe previo a la introducción de un sistema automático de control de la frecuencia en Cuba, Energocetproekt URSS, 1982.

3. Kundur, P.: *Power System Stability and Control*, McGraw Hill Inc., New York, 1994.

4. Martínez García, Antonio A.: "Hacia la optimización de los regímenes del SEN de Cuba", Tesis de Doctorado, Instituto Energético de Moscú, URSS, mayo, 1981.

5. "Estudio de la dinámica de la frecuencia en el SEN cubano para el 2008", *Informe Preliminar*, Grupo de Desarrollo Unión Eléctrica, junio, 2006.

AUTORES

Lázaro Guerra Hernández

Ingeniero Electricista, Máster en Ciencias, Instructor, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail:lazaro@electrica.cujae.edu.cu

Antonio A. Martínez García

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba.

e-mail: amg5057@yahoo.es

Héctor S. Llamo Labori

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail:llamo@electrica.cujae.edu.cu

Maikop Pérez Martínez

Ingeniero Electricista, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail:maykop@electrica.cujae.edu.cu

CIER 2007

Conferencia Internacional de Energía Renovable, Ahorro de Energía y Educación Energética

del 22 al 26 de mayo
Varadero, Cuba