



Consideraciones sobre un estudio de estabilidad transitoria del Sistema Eléctrico Nacional

Susana Leyva
Juan G. Boza
Zaid García

Recibido: Abril del 2008
Aprobado: Mayo del 2008

Resumen / Abstract

Los estudios de los regímenes de los sistemas eléctricos de potencia (SEP) son de gran importancia para lograr el mejor comportamiento del sistema ante diferentes perturbaciones. En este trabajo se profundiza en el estudio dedicado a la estabilidad del sistema para una red eléctrica que se caracterizará por tener altos valores de reactancias y bajos valores de las constantes de inercia. Se destacan los resultados, conclusiones y recomendaciones alcanzadas tras la realización de numerosos estudios.

Palabras clave: Modelos, flujo de cargas, cortocircuitos, Estabilidad y constante de inercia

Studies about regimes of Electric Power Systems (EPS) have a great importance in order to improve Power System performance during different disturbances. In this paper it is deeply analyzed the stability of a power system with a network having high reactance values and low inertia constants. After various studies the results, conclusions and recommendations are presented.

Key words: Models, loads flow, short-circuits, stability and inertia constant

INTRODUCCIÓN

Los estudios de estabilidad de sistemas eléctricos se realizan para investigar la capacidad de estos sistemas de alcanzar un punto de funcionamiento estable tras la ocurrencia de una perturbación: Un cortocircuito o la desconexión de un generador, línea o transformador.¹ Dichos estudios se utilizan para la planificación y explotación de los sistemas eléctricos.

Los sistemas eléctricos pueden presentar características donde la estabilidad es un problema de primer orden. El sistema eléctrico cubano tiene una característica longitudinal (determinada fundamentalmente por la configuración larga y estrecha

de la isla), se encuentra enlazado a 220 kV, con una mayor densidad de carga hacia la zona centro-occidental, donde también se agrupan las fuentes de generación más eficientes del sistema (Guiteras "AG", Céspedes "CMC" y otras).

Desde el 2006 el sistema ha experimentado un crecimiento muy notable, con expectativas de mantener el crecimiento de la demanda con la entrega de los efectos electrodomésticos a la población, la recuperación del sector industrial y turístico en la economía. En estas condiciones se plantea la necesidad de la instalación de un nuevo grupo de generación de energía eléctrica considerando la

instalación de grupos electrógenos, accionados por motores diésel y fuel.

La estructura del Sistema Electroenergético Nacional (SEN) para los años venideros poseerá características diferentes a la de años anteriores, destacándose una red eléctrica con altos valores de reactancias y bajos valores de las constantes de inercia. Esto puede provocar una disminución de la estabilidad del sistema.²

Ante esta nueva estructura del SEN se acometen los estudios pertinentes. En este trabajo se profundiza en el estudio dedicado a la estabilidad del sistema.

Se destacan los resultados, conclusiones y recomendaciones alcanzadas tras la realización de numerosos estudios.

CAUSAS DE LA SITUACIÓN DEL SISTEMA ELECTROENERGÉTICO NACIONAL

En los últimos años las causas principales de los excesivos apagones fueron debido a factores como:

- El fortalecimiento del bloqueo económico contra Cuba.
- El acceso limitado a mercados internacionales.
- El corte abrupto de los suministros de petróleo y sus altos precios.

- La imposibilidad de realizar mantenimientos y reparaciones a centrales eléctricas y redes de distribución.
- El azote cada vez más frecuente de huracanes.

Estos factores mencionados anteriormente provocaron fuertes afectaciones al servicio y era necesario operar el sistema en regímenes agravados con altas transferencias de Oriente a Occidente y viceversa.³ La figura 1 muestra la energía dejada de servir en el período del 2000 al 2006.

La estrategia a seguir consistió en la instalación de la generación in-situ, junto con otro grupo de tareas encaminadas al mejoramiento de la calidad del servicio.

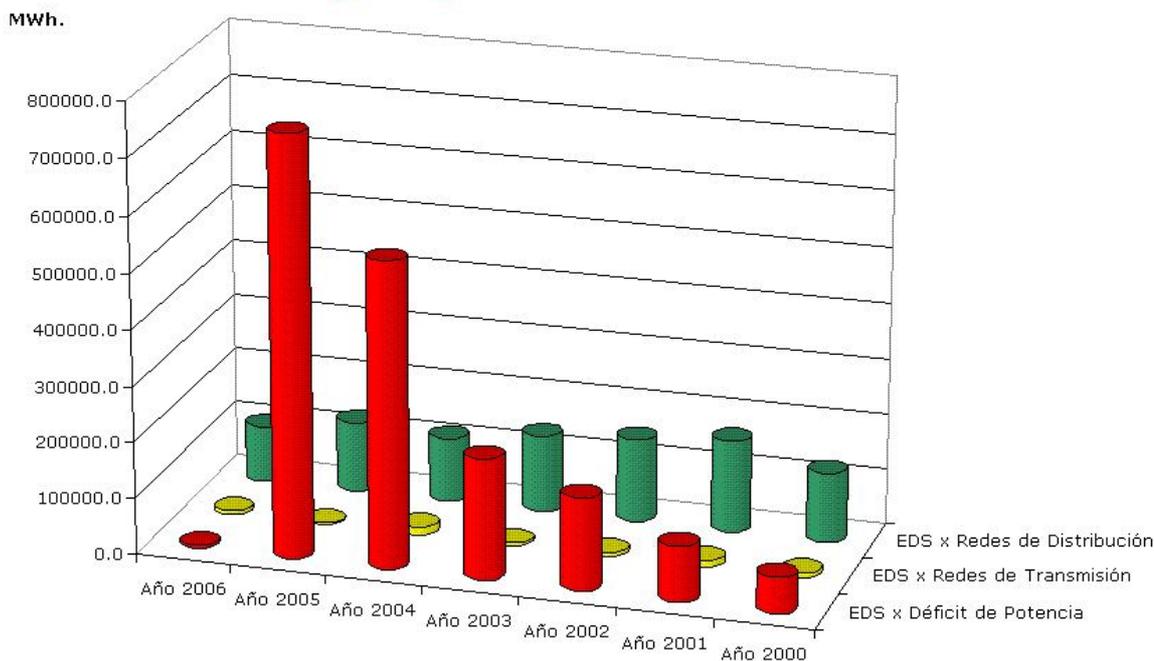
La tabla 1 detalla las características del SEN, potencia instalada y pronóstico de la demanda previstas para los años 2008 y 2010.

Para satisfacer el incremento de la demanda se están instalando unidades de generación con grupos electrógenos, y a principios del año 2009 la incorporación de un ciclo combinado de 125 MW.

ESTUDIOS REALIZADOS

Los estudios para la planificación de sistemas eléctricos comprenden:

- o Determinación del pronóstico de la demanda.
- o Selección de escenarios de generación.



Fuente: Memoria 2006. www.dnc.minbas.cu

Energía dejada de servir entre el 2000 y el 2006.

- o Estudios de la dinámica de la regulación de frecuencia.
- o Estudios de flujo de cargas, contingencias y cortocircuitos.
- o Estudios de estabilidad transitoria.

Tabla 1 Descripción de las principales características del SEN, correspondiente a los años 2008 y 2010							
Año	Potencia instalada (MW)					Pronóstico de la demanda	
	Térmicas	Gas	Hidro	Diésel	Fuel	Máxima (MW)	
						Invierno	Verano
2 008	2 940	395	43	1 282	1 066	2 920	2 680
2 010	2 940	520	43	1 282	1 717	3 200	2 880

Fuente: Elaborada por los autores

PRONÓSTICO DE LA DEMANDA

El punto de partida para realizar estudios de un sistema eléctrico está en la realización de un pronóstico de la demanda y el consumo, para todo el país, por territorios y por provincias, en diferentes épocas del año y en diferentes horarios; que permita simular una condición del Sistema Electroenergético Nacional lo más cercana posible a la realidad del momento que se analice.

SELECCIÓN DE ESCENARIOS

La confección de escenarios consiste en el establecimiento del despacho de generación, la distribución de la demanda por nodos y la topología de red, con ello se determina la distribución óptima de la generación entre las fuentes generadoras. Para que un sistema eléctrico opere correctamente, es necesaria la existencia de una cierta capacidad de reserva debido a que los generadores y otros elementos que lo forman están sujetos a salidas de emergencia provocadas por las fallas.⁴ Por ello, el despacho de generación deberá reflejar además la magnitud de la reserva rodante.

ESTUDIOS DE LA DINÁMICA DE LA REGULACIÓN DE FRECUENCIA

Los estudios de la dinámica de la frecuencia de los sistemas eléctricos son importantes pues permiten conocer cuáles serían las variaciones de frecuencia del sistema en el tiempo ante variaciones bruscas de la carga, permitiendo tomar las medidas necesarias para evitar que la frecuencia alcance valores que puedan provocar averías en el sistema o dar lugar a descargas automáticas de frecuencia (DAF).

La simulación de la respuesta dinámica de la frecuencia de los sistemas eléctricos requiere modelar con precisión los componentes de los mismos:

Generadores, controles asociados (regulador de carga-velocidad y turbina), así como el estatismo de la carga (respuesta de la carga con la variación de la frecuencia).¹

En algunas ocasiones, los modelos de los gobernadores disponibles en las bibliotecas estándar de los programas de simulación, no permiten representar los gobernadores encontrados en los sistemas reales. Para resolver este problema, es necesario desarrollar modelos específicos utilizando programas de simulación. El modelado se ha realizado mediante la herramienta de simulación Simulink de Matlab.

La validez de los modelos de los gobernadores empleados se comprueba comparando la modelación con las pruebas de fábrica de cada fabricante. El comportamiento de los mismos para la mayoría de los aspectos queda satisfactoriamente caracterizado siempre y cuando el tiempo de establecimiento, la máxima desviación de frecuencia o caída al valor mínimo de la frecuencia y tiempo de caída de la frecuencia a dicho valor sean similares.⁵

La inercia total del sistema determina la pendiente de caída de la frecuencia. Un error en la inercia puede afectar significativamente dicho valor. La respuesta de los reguladores de velocidad establece el tiempo de recuperación de la frecuencia.⁶

FLUJO DE CARGAS, CONTINGENCIAS Y CORTOCIRCUITOS

Los estudios de flujos de cargas determinan el punto de funcionamiento del sistema eléctrico en los escenarios en estudio. Los estudios de flujo de cargas proporcionan:

- Perfil de tensiones.
- Transferencia por líneas y transformadores.
- Pérdidas en las líneas de transporte.

El análisis de contingencias N-1 determina las variaciones de tensiones y flujo de cargas en caso de desconexión de cualquier línea o transformador. El análisis de contingencias por desconexión de un generador se realiza en los estudios de estabilidad transitoria y no por análisis en régimen en estado estable ya que los problemas relevantes causados por este tipo de contingencias son de carácter dinámico.

Los estudios estáticos de cortocircuitos se realizan en los sistemas eléctricos para el ajuste de las protecciones, determinar la capacidad interruptiva y determinar valores de tensión en los nodos del sistema.

ESTUDIOS DE ESTABILIDAD

Los estudios de estabilidad comprenden la simulación en el dominio del tiempo de diferentes perturbaciones (cortocircuitos y desconexión de generadores y líneas). El objetivo de los estudios de estabilidad es:

- Evaluación de los tiempos de desconexión de la falla.
- Comportamiento del sistema ante la desconexión de generadores.
- Amortiguamiento de las oscilaciones de potencia y tensión.
- Evaluación de los esquemas de desconexión de cargas por frecuencia y tensión.

En los estudios de estabilidad es necesaria la modelación de todos los elementos y dispositivos que tienen influencia en la dinámica del sistema. Entre ellos se pueden encontrar:

- Generadores.
- Sistemas de excitación.
- Cargas.

MODELOS DE LAS UNIDADES GENERADORAS

En la literatura,⁷ se establece diferentes modelos de máquinas sincrónicas.

En los estudios de estabilidad el modelo detallado de la máquina sincrónica (enrollado amortiguador y los modelos del sistema de excitación y de la turbina detallados) es el más conveniente.

En el programa Power System Explorer (PSX) se identifican los siguientes modelos para las máquinas sincrónicas:

Modelo I: Magnitud de la tensión constante detrás de la reactancia transitoria ($X'd$).

Modelo II: Máquina de polos salientes con efecto transitorio en el eje directo (d).

Modelo III: Máquina de rotor cilíndrico con efectos transitorios en ambos ejes (d, q).

Modelo IV: Máquina de polos salientes con efecto subtransitorio en los ejes d y q .

Modelo V: Máquina de rotor cilíndrico con efecto subtransitorio en los dos ejes.

MODELO DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN

Se emplean los sistemas de excitación de las unidades generadoras, atendiendo a la excitatriz, las cuales se clasifican en:

- Sistemas de corriente directa (tipo CD).
- Sistemas de corriente alterna (tipo CA).
- Sistemas estáticos (tipo ST).

En el estudio de la estabilidad realizado en este trabajo ha sido necesario efectuar la identificación, por algoritmos genéticos, de los parámetros del modelo DC2 del PSX para simular el modelo conocido como AC5A de la IEEE entregado por los fabricantes de los grupos electrógenos.

MODELO DE LAS CARGAS

Se utiliza el modelo general definido en las referencias 8 y 9 para representar las cargas: Estáticas, de potencia constante y de impedancia constante.

MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD TRANSITORIA

De acuerdo con el procedimiento establecido en el Despacho Nacional de Cargas (DNC) de la Unión Eléctrica (UNE),¹⁰ se siguen los siguientes pasos:

- Elevar la rapidez de desconexión de las fallas para reducir el área de aceleración y aumentar el área de frenaje.
- Recierres automáticos ante las fallas transitorias.
- Limitar la carga activa de las máquinas de las plantas alejadas con el objeto de disminuir el ángulo de desplazamiento de dichos generadores con respecto al sistema.
- Reguladores automáticos de excitación rápidos.
- Automática selectiva de desconexión de carga.
- Separación del sistema (como última opción).

PERTURBACIONES CONSIDERADAS

En este trabajo se consideran las siguientes perturbaciones:

- Cortocircuitos monofásicos y bifásicos a tierra en líneas seleccionadas atendiendo al nivel de transferencia de potencia activa.
- Desconexión de unidades generadoras.
- Desconexión de líneas.

Para el tratamiento de las protecciones se consideran tiempos de apertura de 80-120 ms para la operación rápida y para la operación secuencial 80-120 ms en primera zona y 400 ms por segunda zona con operación monopolar o tripolar, los recierres exitosos se consideran con tiempo de operación de un segundo (1s).

FALLAS BIFÁSICAS A TIERRA

Después de la realización de numerosos estudios, con la ocurrencia de fallas bifásicas a tierra, se llegaron a los siguientes resultados:¹²

1. Para protecciones rápidas se conserva la estabilidad en todas las líneas consideradas.
2. Para la operación secuencial de las protecciones, en general se pierde la estabilidad con transferencias superiores a 100 MW en líneas de 220 kV y 50 MW en líneas de 110 kV.
3. En el caso del lazo de La Habana con la operación secuencial de las protecciones se pierde la estabilidad para transferencias inferiores a 50 MW en las líneas de 110 kV.
4. En los casos estables el recierre exitoso permite restablecer la topología de la red y los niveles de tensión.
5. Ante la ocurrencia de esta falla en las líneas del lazo se pierde la estabilidad del ángulo en las unidades generadoras conectadas al lazo y puede representar

una desconexión de un total de 250 a 400 MW, dependiendo del caso analizado, por la acción de la desconexión automática por tensión.

DESCONEXIÓN DE UNIDADES GENERADORAS

La desconexión de una unidad o grupo de generadores es una perturbación relevante en el sistema debido a que puede dar lugar a grandes variaciones de frecuencia. La misma puede alcanzar valores del orden de 56 o 57 Hz.

La reserva rodante limita las desviaciones de frecuencia tras la desconexión de un generador. Sin embargo, se pueden alcanzar valores transitorios inadmisibles de la frecuencia o incluso se puede producir el colapso del sistema si la generación de las unidades con capacidad de reserva no aumenta con suficiente rapidez.¹¹

En los regímenes estudiados la desconexión de generadores no provoca la pérdida de estabilidad del ángulo y se observan en todos los casos oscilaciones amortiguadas de la potencia por las líneas.

La figura 2 muestra el comportamiento de la frecuencia en el sistema, al producirse la desconexión de un generador de 280 MW, considerando la desconexión de carga por frecuencia y sin considerarla.

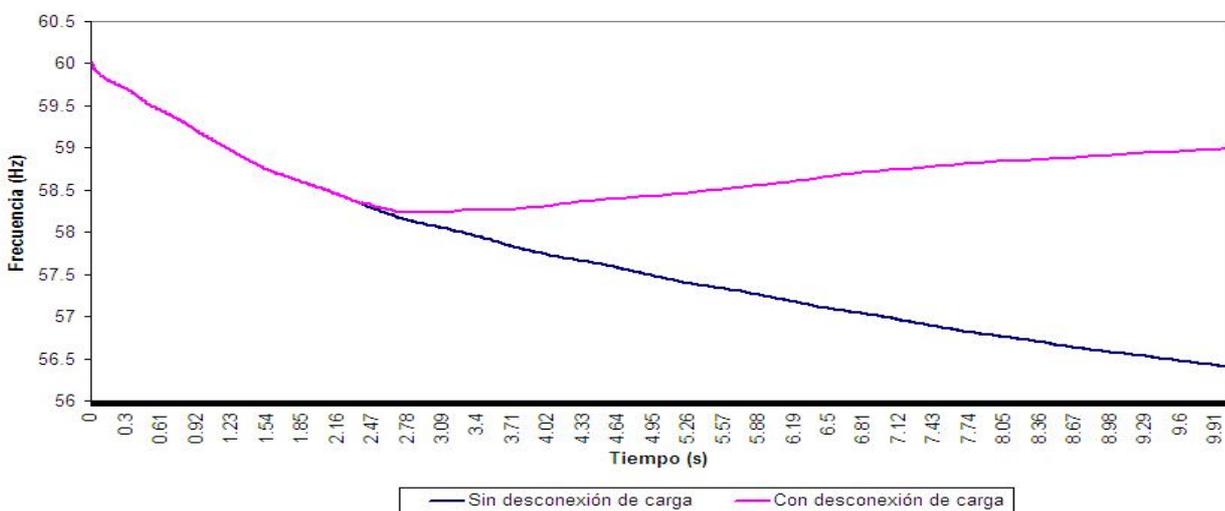
Por tanto, los sistemas eléctricos de potencia deben estar dotados de esquemas de desconexión de cargas para asegurar el funcionamiento del sistema en caso de que la capacidad de reserva no actúe con la rapidez necesaria ante perturbaciones de desconexión de generadores.¹¹

Es preciso resaltar que la desconexión de generadores puede afectar también al balance de potencia reactiva en las zonas del sistema. En efecto, la desconexión de un grupo de generadores en una zona no solo determina la pérdida de la generación de potencia reactiva en la zona, sino también un aumento de las pérdidas de potencia reactiva en todo el sistema por el aumento del transporte desde otras zonas del sistema. Cuando la red de transporte está cerca de sus límites, se puede producir el colapso de tensión del sistema aún cuando el equilibrio de potencia activa se mantenga por actuación de la regulación primaria y de los esquemas de desconexión de cargas por frecuencia. Estos casos ponen de manifiesto la necesidad de dotar a los sistemas en algunas zonas de esquemas de desconexión de cargas por tensión.¹

DESCONEXIÓN DE LÍNEAS

Se analizaron además la desconexión de las líneas a 220 kV con mayor transferencia, sin ocurrencia de

Comparación de la evolución de la frecuencia al producirse la desconexión de un generador de 280 MW en el sistema considerando la desconexión de carga por frecuencia y sin considerarla.



Comportamiento de la frecuencia con la desconexión de un generador.

Fuente: Elaborada por los autores.

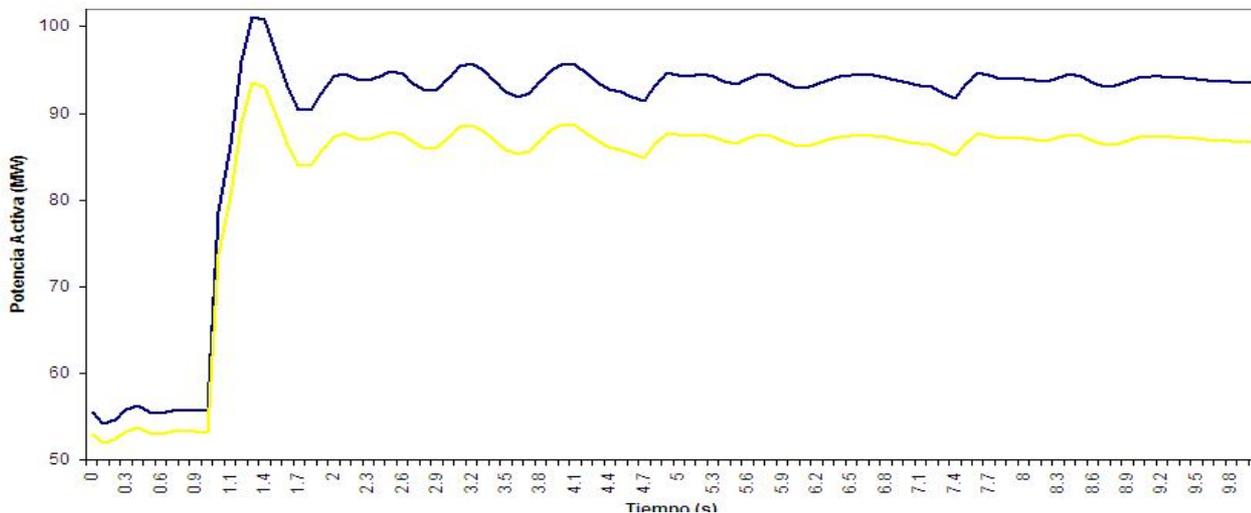
fallas, y se observó que la desconexión de las mismas no provoca la pérdida de estabilidad del ángulo.

En la figura 3 se observan las oscilaciones que se producen en las líneas próximas a la línea de 220 kV que se desconecta con un valor de transferencia de potencia activa de 143 MW.

La figura muestra las oscilaciones, provocadas en líneas aledañas por la salida de la línea más cargada de ese régimen analizado.

Se comprueba la efectividad de provocar disparos de unidades generadoras seleccionadas ante la pérdida de sincronismo para evitar la salida en cascada de las mismas y en algunas zonas limitar la potencia activa de las unidades generadoras seleccionadas, para casos de fallas bifásicas a tierra en la línea que originan inestabilidad, constituye una medida puntual efectiva para el mejoramiento de la estabilidad transitoria.¹²

Oscilaciones de las transferencias por líneas aledañas al producirse la desconexión de la línea de 220 kV de mayor transferencia.



Comportamiento de la potencia activa por líneas aledañas con la desconexión de la línea de 220 kV más cargada.

3

CONCLUSIONES

En general, el sistema conserva la estabilidad ante la ocurrencia de fallas monofásicas y bifásicas a tierra si se eleva la rapidez de desconexión de las fallas.¹²

La diferencia fundamental de este tipo de estructura del SEN con respecto a la de años anteriores es la incorporación de algunas unidades generadoras con bajo valor de inercia y altos valores de reactancia, fundamentalmente ubicadas en el lazo de La Habana. En general, las inercias de estos nuevos grupos generadores son menores que las unidades que están en explotación en el SEN, por tanto, ellas tienden a responder más rápido a los disturbios, esto significa que una falla en la vecindad de estas nuevas unidades generadoras puede provocar la pérdida de sincronismo de las mismas.

En los casos en que se conserva la estabilidad, ante fallas, se presentan oscilaciones amortiguadas de tensión y transferencias de potencia por las líneas.

El sistema cuenta con un esquema de desconexión de cargas que mejora y/o asegura la estabilidad del sistema en caso de desconexión de una unidad generadora o grupos de generadores y que minimiza la magnitud de la carga desconectada, con la combinación de protecciones por derivada de frecuencia con las protecciones por baja frecuencia.

RECOMENDACIONES

Se debe trabajar para ajustar los valores de volumen de la carga a desconectar y tiempo de operación de la descarga automática por frecuencia y descarga automática por tensión correspondientes a la red a explotar a partir del año 2008.

REFERENCIAS

1. **Kundur, P.:** *Power System Stability and Control*, Mc Graw Hill, Inc. 1993.
2. **IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis, Std 399-1997.**
3. **Manual de calidad de generación distribuida** UNE, Cuba.
4. **Zaborszky, J. et al.:** *Electric Power Transmission*, Ediciones R. Cuba, 1954.
5. **Martínez A. A. y L. Guerra:** "Estudio de la dinámica de la frecuencia en el SEN Cubano para el 2008", *Informe preliminar*, Grupo de Desarrollo Unión Eléctrica, junio, 2006.
6. **Anderson, P. M.:** *Power System Protection*, 1999.
7. **González Cueto, José A.:** "Aplicación de desarrollo de métodos para el análisis de redes eléctricas de potencia", Tesis doctoral, Universidad Central de Las Villas, Cuba, 2000.
8. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 3, No.1, February, 1988.
9. **Arrillaga, J. y otros:** *Computer Modelling of Electrical Power System*, pp. 214- 222, 1983.
10. **Manual de procedimientos**, Cod: DN RN-0007, Rev: 00, 13/6/2000.
11. **Elices, A. y L. Rouco:** *Análisis Fundamental, del impacto de la reserva primaria en sistemas eléctricos aislados*, Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), ETS de Ingeniería (ICAI), Universidad Pontificia Comillas, Madrid.

12. **Boza V., J.; Z. García S. y S.Leyva C.:** "Informes técnicos sobre el estudio de la estabilidad transitoria del SEN para el período 2008-2010", INEL-UNE, Ciudad de La Habana, Cuba, octubre 2007,

AUTORES

Susana Leyva Condeff

Ingeniera Electricista, Despacho Nacional de Carga, Unión Eléctrica, Cuba
e-mail:susanal@dnc.minbas.cu

Juan G. Boza Valerino

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular Consultante, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail:jboza@electrica.cujae.edu.cu

Zaid García Sánchez

Ingeniera Electricista, Máster en Ciencias, Asistente, Centro de Estudios Electroenergéticos (CEE), Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Cuba
e-mail:zaid@uclv.edu.cu