



APLICACIONES INDUSTRIALES

Modelación de la carga para estudios estáticos de estabilidad de tensión

Modelling of the load for stable state studies of voltage stability

Zaid García Sánchez
José A. González-Cueto

Leonardo Casas Fernández
Juan G. Boza

Recibido: Julio del 2012

Aprobado: Noviembre del 2012

Resumen/ Abstract

En este trabajo se presenta un análisis de la influencia de la naturaleza de la carga en la estabilidad de tensión. El margen de carga es un índice considerado exacto para el análisis de la estabilidad de la tensión, sin embargo tradicionalmente se ha asumido la carga para obtener este índice como carga de potencia constante, esto no refleja fielmente el comportamiento de la misma cuando se deterioran las condiciones de tensión en el sistema eléctrico. Se demuestra la influencia del factor de potencia de la carga en la obtención del punto de máxima carga del sistema, así como la influencia de la misma en la obtención del punto de estabilidad por tensión y el punto de máxima carga. Se implementó un programa para la determinación en tiempo real del margen de carga. La metodología fue probada con sistemas de prueba de la IEEE y con un sistema real.

Palabras clave: carga, estabilidad de tensión, punto crítico.

In this paper an analysis of the influence of the nature of the load is presented in the stability tension. The load margin is an exact indices to analyses voltage stability, however traditionally it has been considered the load for obtain these indices as a constant power load, this does not show faithfully the behavior of the load when the condition of tension in the electric system are deteriorate. It is demonstrated the influence of the load power factor in the obtaining of the maximum power load of the system, such as the influence of this one in the obtaining of the stability point and maximum load point. This paper presents software to obtain the load margin for on-line studies. The methodology was tested with IEEE test systems and a real system.

Key Words: load, voltage stability, critical point.

INTRODUCCIÓN

La estabilidad de tensión ha sido en las últimas décadas la principal limitante en la operación de los sistemas eléctricos de potencia (SEP). Esto se debe a que con el gran desarrollo industrial alcanzado, el incremento del consumo de electricidad y la aparición de los denominados mercados eléctricos, las redes de transmisión han sido operadas cerca de los límites de estabilidad. La estabilidad de tensión ha despertado el interés de la comunidad científica internacional, varios trabajos científicos se encaminan a la búsqueda de nuevas técnicas para su análisis.

Las referencias [1-3], muestran que este fenómeno puede causar serias consecuencias en los sistemas eléctricos y por esto es de vital importancia el desarrollo de métodos que permitan un análisis adecuado del problema, permitiendo la realización de acciones y medidas correctivas que eviten la ocurrencia de este fenómeno. En este trabajo se evalúa la influencia de los coeficientes que caracterizan la dependencia de la carga con la tensión en la determinación del punto de máxima carga del sistema eléctrico de potencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

En [1], se expresa que la inestabilidad de tensión se produce por el intento de la carga de mantener su demanda más allá de las capacidades de transmisión y generación. Es por esto que la modelación de la carga es de vital importancia en los estudios estáticos y dinámicos de la estabilidad de tensión. Varios artículos y trabajos científicos [4-7], detallan la naturaleza de la carga, su influencia en la estabilidad de la tensión, las técnicas y coeficientes para modelarla [8]. La estabilidad de tensión se ve fuertemente influenciada por la demanda de reactivo y es por esto que el factor de potencia de la carga es también un aspecto interesante a tener en cuenta.

En Cuba, el profesor Leonardo Casas como parte de un proyecto con el Despacho Nacional de Carga (DNC), ha realizado estudios para determinar los coeficientes que describen la dependencia de la carga con la tensión. La determinación de estos coeficientes permite mejorar los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas por los especialistas del DNC para el análisis de la operación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN). En [9], se realiza un estudio detallado del comportamiento de la carga en una subestación típica de la ciudad de Santa Clara, en este trabajo obtienen, basados en mediciones realizadas, los coeficientes que permiten modelar la dependencia de la carga con la tensión para diferentes horarios del día. La tabla 1, muestra que en ninguno de los casos el comportamiento de la carga puede considerarse como carga de potencia constante y que los coeficientes que caracterizan la dependencia de la potencia activa y reactiva con la tensión son diferentes. Es importante señalar que estos coeficientes varían en dependencia de la hora del día y época del año en que se realice la medición, los valores mostrados en la tabla 1, se corresponden con mediciones realizadas en la época de invierno. El comportamiento del "Conjunto" está caracterizando para un nodo donde hay combinación de cargas residenciales con alto valor de P_V debido a las cocinas eléctricas, y cargas industriales con bajo valor de P_V debido al predominio de los motores eléctricos.

Tabla 1. Valores obtenidos de los coeficientes que caracterizan la dependencia de la carga con la tensión.

| Hora | 7:23 horas | | 10:06 horas | | 11:52 horas | | 15:08 horas | | 18:19 horas | |
|----------|------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
| Circuito | P_V | Q_V | P_V | Q_V | P_V | Q_V | P_V | Q_V | P_V | Q_V |
| 124 | 1,19 | 4,5 | 1,25 | 3,93 | 1,57 | 3,68 | 1,1 | 3,69 | 1,73 | 3,64 |
| 108 | 1,28 | 4,77 | 1,2 | 4,35 | 1,59 | 5,45 | 0,93 | 4,58 | 1,68 | 4,25 |
| 119 | 0,63 | 3,38 | 1,07 | 3,56 | 1,68 | 4,66 | 1,49 | 4,64 | 1,5 | 3,26 |
| 129 | 1,03 | 3,4 | 0,96 | 3,19 | 0,77 | 2,55 | 0,97 | 3,54 | 1,23 | 3,32 |
| 861 | 1,22 | 6,72 | 1,09 | 4,06 | 0,9 | 4,57 | 0,81 | 3,82 | 1,6 | 5,08 |
| Conjunto | 1,1 | 4,45 | 1,13 | 3,9 | 1,26 | 4,13 | 0,98 | 3,94 | 1,7 | 4,25 |

Para el sistema mostrado en la figura 1, se determinan las curvas P-V para el caso de las dos líneas en servicio figura 1 a) y para la salida de la línea 2 figura 1 b).

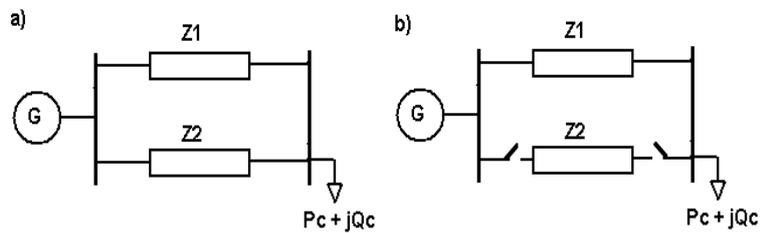


Fig. 1. Esquema simple de tres nodos. a) Sistema íntegro b) Desconexión de una línea de transmisión.

La figura 2, muestra cómo afecta la representación de la carga en la estabilidad de tensión y en la obtención de los nuevos puntos de operación para las condiciones analizadas y la ocurrencia o no de un colapso de tensión. La diferencia de estos puntos es importante desde el punto de vista de planificación y operación del sistema eléctrico.

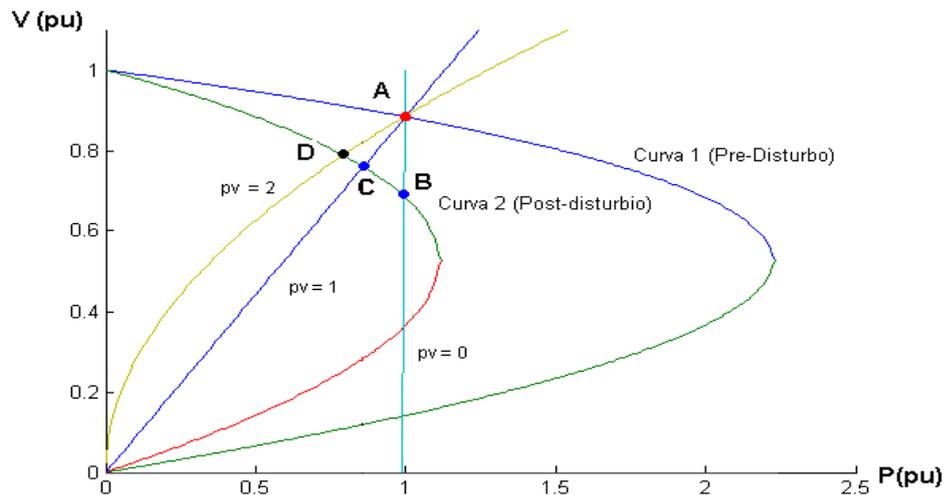


Fig. 2. Curvas P-V cuando se desconecta una de las líneas paralelas.

Para el caso base existe un punto de solución (A) y al producirse la salida de la línea 2, utilizando la representación de potencia constante se obtiene el punto B. Sin embargo la mayoría de las cargas son dependientes de la tensión, por ejemplo para una carga de corriente constante la solución ahora es el punto C y para una de impedancia constante el punto D. Las diferencias de estos puntos son importantes. La situación actual en C corresponde con condiciones menos cargadas y mejores valores de tensión en el sistema que las del punto B, donde se modela la carga según el modelo tradicional de los flujos de cargas. En este caso el impacto de la carga en el sistema está sobredimensionado lo cual puede conllevar a una pobre utilización del sistema de transmisión. En [1], se valoran las principales potencialidades de los programas computacionales existentes y la forma en que modelan la carga. Algunos de ellos no tienen en cuenta la variación de la carga con la tensión, es decir mantienen las consideraciones hechas hasta ahora para los estudios de flujos de carga, P y Q constantes. Por otro lado, algunos programas como PSAF modelan la carga de impedancia, corriente y potencia constante, esta modelación aunque considera la variación de la carga con la tensión no varía el factor de potencia de la misma a medida que se deterioran las condiciones de tensión en el sistema. Estas dos consideraciones pueden conllevar a resultados alejados de la solución real [1], [4], [6-7].

Influencia del factor de potencia de la carga

La inestabilidad de tensión se asocia fundamentalmente a la demanda de potencia reactiva de la carga y por tanto al factor de potencia de la misma. A medida que se deterioran las condiciones de tensión en el sistema el factor de potencia no se mantiene constante y en la mayoría de los casos según los coeficientes en [1] y [8] este mejora con el decaimiento de la tensión.

El ejemplo siguiente (figura 3) explica la importancia de considerar la posible variación o no del factor de potencia para los estudios estáticos de estabilidad de tensión.

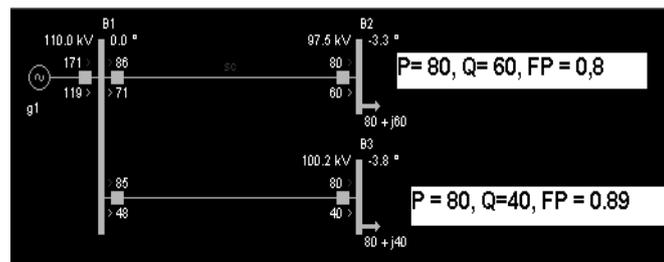


Fig.3 Monolineal del ejemplo.

Como se aprecia en la figura 3, la carga conectada al nodo B2 presenta mayor demanda de potencia reactiva que la conectada al nodo B3, para valores iguales de potencia activa en ambas cargas. Si se aumenta la carga a factor de potencia constante, considerando que ambas varían linealmente con la tensión, la primera en alcanzar su límite es la carga 2 como se aprecia en la figura 4.

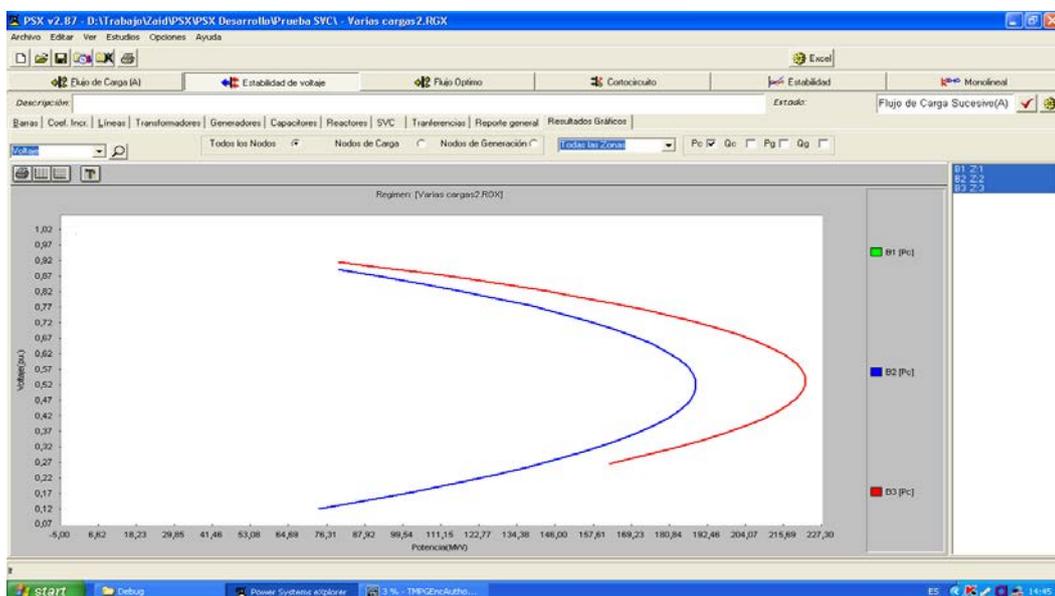


Fig. 4. Curva P-V para cargas variando a factor de potencia constante.

Por el contrario si se considera que en la carga dos la potencia reactiva varía de forma cuadrática con la tensión y la carga tres se mantiene como carga de corriente constante, la carga tres, de

mejor factor de potencia en el caso base, es la que primero llega al límite de estabilidad de tensión como muestra la figura 5.

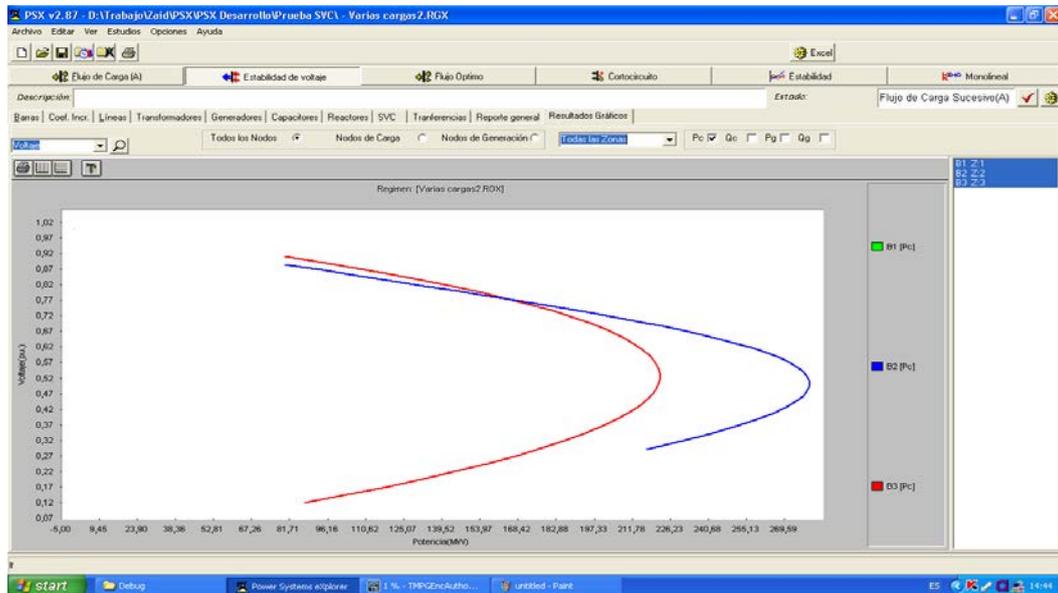


Fig.5. Curva P-V para la carga 3 variando a factor de potencia variable.

Según [1] considerar la carga como potencia constante es válido en sistemas fuertemente compensados y donde las derivaciones de los transformadores no estén bloqueadas o no hayan alcanzado sus límites de variación como lo demuestra también [6]. Aunque la mayoría de los programas de flujos consideran la carga como potencia constante, se ha demostrado en [5-7], que un mayor acercamiento a la realidad se produce considerando las variaciones de esta con la tensión.

RESULTADOS

Influencia de la naturaleza de la carga en la determinación del punto crítico por estabilidad de tensión y el punto de máxima carga.

Considerar la variación de la carga con la tensión en los métodos para determinar el margen de carga, hace que el punto crítico por estabilidad de tensión o punto de bifurcación nodo-silla y el punto de máxima carga no coincidan. Este problema se ilustra en [1], para el esquema mostrado en la figura 6.

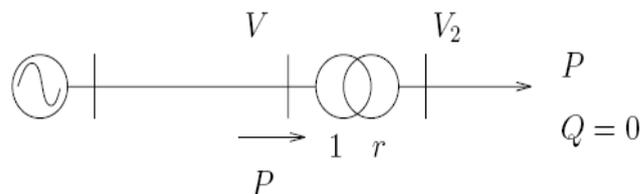


Fig. 6. Sistema eléctrico simple.

La figura 7, muestra las curvas P-V del caso, un incremento de la carga hace que el punto se mueva desde **A** hasta **C**. En el punto **M** la carga es máxima, sin embargo entre **M** y **C** el sistema aún es estable. **C** corresponde con el límite de estabilidad y **M** con el punto de máxima carga del sistema, la diferencia entre estos dos puntos se debe a la consideración de la carga variable con la tensión. Un valor negativo de las sensibilidades V-Q denota una operación inestable del sistema, por esto en la metodología propuesta se calculan las dichas sensibilidades para discernir entre el punto de máxima carga y el punto de estabilidad de tensión.

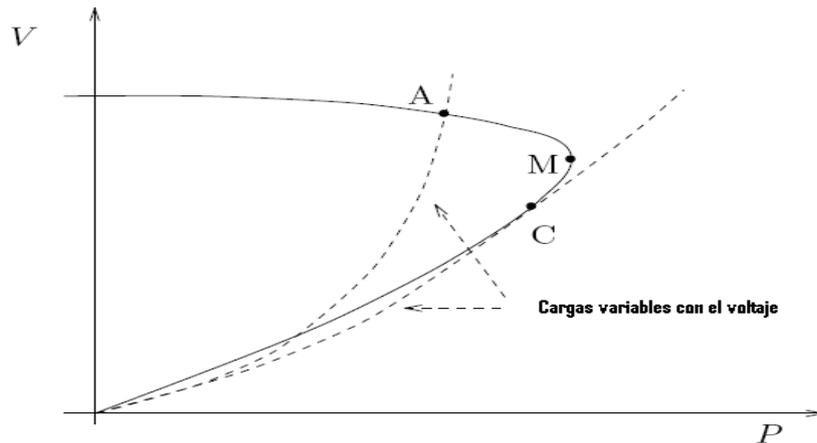


Fig. 7. Curvas P-V del sistema simple.

En [6], se muestran investigaciones en el tema de la modelación de la carga para estudios en SEPs, estas han estado dedicadas fundamentalmente a la obtención de los coeficientes que caracterizan las dependencias de activo y reactivo de la carga con la tensión. En [8], se resumen los coeficientes para los principales tipos de cargas.

RESULTADOS OBTENIDOS

Caso de estudio al SEN. Descripción del régimen.

El régimen corresponde con una demanda de invierno, con generación en centrales térmicas, plantas de gas y en grupos electrógenos diesel y fuel oil. Las demandas de potencia activa y reactiva, así como la generación por zonas y total del sistema se muestran en la tabla 2. De estos datos se excluyen los datos de las aceras por ser cargas a las que no se le variará su demanda.

| Tabla 2. Carga y generación total del SEN. | | | | |
|--|---------|-----------|--------|---------|
| Régimen | Totales | Occidente | Centro | Oriente |
| Carga Activa (MW) | 2622,0 | 900,0 | 644,7 | 1020,3 |
| Carga Reactiva (MVAR) | 1068,0 | 367,6 | 268,5 | 415,2 |
| Generación Activa (MW) | 2672,4 | 702,9 | 773,8 | 1195,1 |
| Generación de Reactivo (MVAR) | 1061,1 | 382,4 | 252,5 | 236,5 |
| Reserva de Reactivo (MVAR) | 963,0 | 105,8 | 240,7 | 617 |

Uno de los aspectos principales de la estabilidad de tensión es la influencia de las contingencias en la reducción del límite de carga. La tabla 3, muestra el margen de carga de la zona occidental ante la salida de líneas y generadores. Se considera que los motores fuel y diesel no participan en la regulación de la tensión. La tabla además compara la reserva considerando la carga como potencia constante y cargas variables con la tensión.

| Contingencia | $p_v = 1 \quad q_v = 2$ | | $p_v = 1.7 \quad q_v = 4,25$ | | Potencia Constante | |
|----------------------------------|-------------------------|-------------|------------------------------|-------------|--------------------|-------------|
| | λ | Reserva (%) | λ | Reserva (%) | λ | Reserva (%) |
| Caso Base | 1,168 | 16,8 | 1,197 | 19,7 | 1,054 | 5,4 |
| Línea CTE Habana-Guiteras 220 kV | 1,083 | 8,33 | 1,125 | 12,5 | 1,002 | 0,21 |
| Guiteras (330 MW) | 0,979 | -2,1 | 1,023 | 2,3 | 0,896 | -10,4 |
| Maríel (100 MW) | 1,085 | 8,5 | 1,131 | 13,1 | 0,906 | -9,4 |

En [8], se expresa que de no disponer de los coeficientes reales de la carga, una buena aproximación sería utilizar valores de 1 para caracterizar la dependencia de la potencia activa con la tensión y 2 para la potencia reactiva. Los otros valores utilizados corresponden a los obtenidos en [9] para el conjunto a las 18,19 horas. En la tabla 3 se aprecia que la reserva de estabilidad de tensión depende de los valores de los coeficientes que caracterizan la carga. La estabilidad de tensión está fuertemente influenciada por la demanda de potencia reactiva, por esto para valores donde exista una fuerte dependencia del consumo de reactivo con la tensión se aprecia que la reserva de estabilidad de tensión aumenta. Usualmente en los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEPs) se definen valores de reserva de estabilidad de tensión preventivos y de emergencia, a partir de los cuales los operadores del SEP comienzan a tomar medidas que alejen el punto de operación del SEP del colapso de tensión.

Como se aprecia en la tabla 3, para el caso base y todas las contingencias analizadas modelando la carga como potencia constante existen valores de reserva para los cuales deben tomarse medidas que aumenten la reserva de estabilidad de tensión. Generalmente estas medidas incluyen la desconexión de carga o la entrada en servicio de unidades que por su costo de operación no participan en el cubrimiento diario del gráfico de carga.

Para las cargas dependientes de la tensión se observa que la reserva de estabilidad es mucho mayor, trabajando en la mayoría de los casos de forma segura. Lo expresado anteriormente evidencia la pobre utilización del sistema de transmisión que se produce si en los estudios de estabilidad de tensión se consideran las cargas como potencia constante, aumentando muchas veces el costo de operación.

CONCLUSIONES

Existe una fuerte tendencia en la actualidad a estudiar y perfeccionar los modelos de carga que se utilizan en los estudios de los SEPs. La determinación de los coeficientes que caracterizan a estos modelos permiten evaluar de forma más exacta los márgenes de estabilidad de tensión, permitiendo operar el SEP de forma más económica. Por otra parte utilizar coeficientes que no hayan sido determinados experimentalmente puede provocar la determinación de reservas de estabilidad de tensión optimistas, aumentando el riesgo de la ocurrencia del colapso de tensión. En Cuba se han realizado estudios a subestaciones típicas, mostrando que para ninguno de los casos la carga se comporta como carga de potencia constante, incluso que los coeficientes varían en dependencia del horario del día.

REFERENCIAS

- [1]. *IEEE/PES Power System Stability Subcommittee* "Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools" Special publication, final draft, (2003).
- [2]. *IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions* "Definition and Classification of Power System Stability" Special publication, final draft, (2003).
- [3]. SHARMA, C. *et al* "Determination of Power System Voltage Stability Using Modal Analysis" *Intern. Conf. on Power Eng., Energy and Electrical Drives*. 2007 p 381-387.
- [4]. DE ANDRADE, J.G y PRIETO, H "A Contribution to the Voltage Stability Studies within Power Systems: Some Aspects Related to the Load Representation" *Proceedings of the World Congress on Engineering 2007*. (London, U.K Julio 2 – 4), vol I, 2007. p. 77-82.
- [5]. GARCIA SANCHEZ, Z. "Metodología para estudios estáticos de la estabilidad de tensión" Director: José Antonio González-Cueto Cruz. Tesis de Doctorado. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, 2011.
- [6]. ROMERO, I "Dinamic Power System Load" Estimation of Time-Varing Parameters During Normal Operation. ".Tesis de Doctorado. Luna University. Sweden, 2005. Disponible en [:http://www.iea.lth.se](http://www.iea.lth.se).
- [7]. SEDIGHIZADEH, M.yREZAZADEH, A. "Dinamic Load Modeling for Khuzestan Power Systems Voltage Stability Studies". *Proceedings of world Academy of Science, Engineering and Technology*. (Boston, December 2007) vol 26,2007, p 45-51.
- [8]. KUNDUR, Prabha. "Power system stability and control" California, Editorial McGraw-Hill, 1994. 1200 p, ISBN 0-07-035958-X.
- [9]. TRONG MAI, V. "Características dinámicas de las cargas" Director: Dr Leonardo Casas Fernández. Tesis de Grado. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, 2011.

AUTORES

Zaid García Sánchez

Ingeniero Electricista, Máster en Ciencias, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios Electroenergéticos (CEE), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Cuba.
e-mail: zaid@uclv.edu.cu

José Antonio González-Cueto Cruz

Ingeniero Electricista, Master en Ciencias, Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Centro de Estudios Electroenergéticos (CEE), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.
e-mail: cueto@elecvc1.une.cu.

Leonardo Casas Fernández

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Centro de Estudios Electroenergéticos (CEE), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.
e-mail: lcasas@uclv.edu.cu

Juan Gualberto Boza Valerino

Ingeniero Electricista, Master en Ciencias, Doctor en Ciencias Técnicas. Centro de Pruebas e Investigaciones Eléctricas (CIPEL). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría Cujae.
e-mail: jboza@electrica.cujae.edu.cu