



Implementación de un estudio de estabilidad de la tensión al Paquete de Programas Psx. 2.87

Implementation a voltage stability study To Psx 2.87 Program

Zaid - Garcia Sánchez
José A. - González-Cueto
Grettel - Quintana de Basterra
Juan G. - Boza

Recibido: Julio del 2012
Aprobado: Noviembre del 2012

Resumen/ Abstract

Las partes estables de las curvas P-V y Q-V pueden ser calculadas mediante el uso de los flujos de cargas convencionales. Este trabajo presenta la implementación de un método estático para los análisis de la estabilidad de tensión. Esta metodología considera las variaciones de la carga con las tensiones y permite determinar el margen de carga desde un punto de operación del sistema al colapso de tensión y obtener la parte inestable de la curva P-V para cargas variables con la tensión. Se implementaron dos métodos para determinar el margen de carga, también se brinda la posibilidad de determinar los límites de transferencias por los principales elementos del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). El programa permite además la realización de un análisis modal mostrando los principales elementos del sistema que contribuyen al colapso de tensión. La metodología fue probada con el esquema patrón de 39 nodos de la IEEE.

Palabras clave: estabilidad de tensión, métodos estáticos, punto crítico.

The stable parts of the curves P-V and Q-V can be calculated based on the conventional power flows. In this paper the implementation of a static method is presented for the analysis of the tension stability. The developed methodology considers the variations of the load with tension and it allows determining the load margin from an operation point of the system to the collapse of tension and obtain the unstable part of the P-V curve for variable loads with the voltage. Two methods were implemented to determine load margin and also offers the possibility to determine the limits of transfer for the main elements of the Electric Power System. The program also allows the realization of a modal analysis showing the main elements of the system that contribute to the tension collapse. The methodology was tested with IEEE 39 nodes test systems.

Key Words: voltage stability, static's methods, critical point.

INTRODUCCIÓN

La estabilidad de tensión ha sido en las últimas décadas la principal limitante en la operación de los SEPs. 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 [1-2] 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 los últimos años el Sistema Electroenergético Nacional (SEN) ha estado sometido a grandes cambios en la estructura de la generación. La utilización de unidades de generación distribuida interconectadas, fue una necesaria solución a los déficits de energía eléctrica en Cuba. Conjuntamente a los beneficios que brinda esta nueva tecnología, se presentan nuevos retos tecnológicos y especialmente en lo que respecta a la operación de los SEPs. Esto conllevó a la realización de estudios por parte de especialistas de la Unión Eléctrica y de las universidades del país para analizar el comportamiento del SEN ante esta nueva composición de la generación y proponer así medidas que permitan la operación adecuada del sistema. No obstante los estudios realizados, en los últimos años se han presentado en el SEN fenómenos asociados a la estabilidad de tensión.

Por tanto se hace necesario e importante el desarrollo de un algoritmo que permita la obtención de los límites de estabilidad de tensión, conjuntamente con esto uno de los aspectos más importantes en estos estudios es la determinación de los principales elementos del SEP que participan en el problema, lo que permite a los operadores y a los especialistas en planeamiento del sistema la toma de medidas que alejen el punto de operación del punto de colapso de tensión.

Se han utilizado muchos índices para evaluar la cercanía del SEP al colapso de tensión [1, 3-5], y para determinar los mismos se han desarrollado diversos métodos analíticos. El margen de carga ha sido el índice más usado para estudios de estabilidad de tensión, muchos de los trabajos científicos en esta temática se dedican al desarrollo y determinación de aquellos índices que evalúen con mayor precisión la proximidad a un posible colapso de tensión.

Los primeros pasos en la determinación del margen de carga estaban asociados a la no convergencia del flujo de carga, sin embargo la singularidad de la matriz jacobiana en el punto de estabilidad de tensión limitó el uso de este método, que aunque muy eficiente computacionalmente, no permitía la obtención del punto exacto, ni la determinación de la parte inestable de las curvas P-V. Los flujos continuados superan estas a costa de esfuerzo computacional más elevado como se puede apreciar en trabajos descritos en [1, 4].

Por otro lado la estabilidad de tensión es conocida también por muchos especialistas como estabilidad de la carga, es por esto que la modelación de la misma juega un papel esencial en los algoritmos desarrollados para la realización de análisis de este fenómeno como se describe en [6].

El siguiente trabajo muestra un procedimiento de cálculo que permite determinar el punto crítico por estabilidad de tensión y la zona inestable de la curva P-V aplicando flujos de carga sucesivos con matriz jacobiana constante y una modelación de la carga acorde a la realidad. Además adecua el método de flujo de carga Newton-Raphson Formal para evitar su singularidad en el punto de colapso de tensión. Esto eleva la potencialidad de la metodología propuesta, al permitir una determinación más exacta y eficiente del punto crítico de estabilidad de tensión, así como el cálculo de la región inestable de la curva P-V para modelación de la carga dependiente con la tensión. La metodología permite discernir entre el punto de máxima carga y el punto de bifurcación estática mediante el cálculo de las sensibilidades y su inclusión como criterio de parada en el algoritmo del flujo sucesivo. Una vez obtenido el punto crítico se realiza un análisis modal caracterizándose el problema de inestabilidad de tensión y determinándose los principales elementos del SEP que contribuyen a la ocurrencia del colapso de tensión.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología desarrollada se basa en la inclusión de la modelación de la carga en las ecuaciones de flujo de carga. Con esta consideración se obtiene de forma exacta el punto crítico por estabilidad de tensión, además permite la obtención del punto de máxima carga y la parte inestable de la curva P-V.

Inclusión de la modelación de la carga en las ecuaciones del flujo de potencia del Newton Raphson Formal

Los términos que caracterizan la dependencia de la potencia activa y reactiva con la tensión son incluidos en los términos N_{kk} y L_{kk} de la matriz jacobiana de los flujos de potencia respectivamente.

Las ecuaciones de ΔP_k y ΔQ_k para los nodos de carga son las siguientes [7]:

$$\Delta P_k = P_k^{sp} - P_k \quad (1)$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{sp} - Q_k \quad (2)$$

Donde:

P_k^{sp} y Q_k^{sp} son las potencia activa y reactiva de la carga conectada al nodo

P_k y Q_k son las potencias que entran o salen del nodo.

Tradicionalmente los estudios de flujos de cargas han considerado la carga como potencia constante, sustituyendo estas consideraciones en las ecuaciones 1 y 2 quedaría

$$\Delta P_k = -P_c - P_k \quad \text{y} \quad \Delta Q_k = -Q_c - Q_k \quad (3)$$

En la ecuación anterior se considera que no existe ningún dispositivo de compensación de reactivo conectado al nodo k . Los términos de la jacobiana que relacionan las variaciones de la potencia activa y reactiva con la tensión son los términos usados tradicionalmente en las ecuaciones de flujo de carga. Sin embargo si se considera la modelación de la carga de forma exponencial como se describe en [7] y se sustituye en las ecuaciones 1 y 2 quedaría.

$$\Delta P_k = -P_o \left(\frac{V_k}{V_{ko}} \right)^{np} - P_k \quad \text{y} \quad \Delta Q_k = -Q_o \left(\frac{V_k}{V_{ko}} \right)^{nq} - Q_k \quad (4)$$

Los términos de la jacobiana que relacionan las $\partial P / \partial V$ y $\partial Q / \partial V$ ahora quedarían

$$N_{kk} = V_k \frac{\partial \Delta P_k}{\partial V_k} = P_k + G_{kk} V_k^2 + P_{ck0} \left(\frac{V_k}{V_{k0}} \right)^{np} \quad (5)$$

$$L_{kk} = V_k \frac{\partial \Delta Q_k}{\partial V_k} = Q_k - B_{kk} V_k^2 + Q_{ck0} \left(\frac{V_k}{V_{k0}} \right)^{nq} \quad (6)$$

Según la teoría de la estabilidad de tensión el punto de máxima carga se asocia con singularidades de la matriz jacobiana debido a que en este punto la dV/dQ se hace cero. La inclusión de la modelación de la carga en los elementos de la jacobiana hace que esta no se haga singular en el punto crítico y por tanto permite soluciones exactas y en la región inestables de la curva P-V.

Inclusión de la modelación de la carga en las ecuaciones del flujo de potencia del Newton Raphson Acoplado Rápido

El método Newton Raphson Acoplado Rápido NRAR forma y factoriza la matriz en la primera iteración, es por esto que no puede considerarse la variación de las potencias activas y reactivas con la tensión dentro de los términos de la matriz jacobiana del sistema eléctrico. La solución a esta problemática se resuelve obteniendo una solución a potencia constante y recalculando la potencia de la carga según el coeficiente que caracteriza la misma para cada iteración.

Determinación del punto de máxima carga

En [8] se desarrolla un algoritmo para la determinación del margen de carga que supera las deficiencias hasta ahora descritas para los flujos sucesivos. El mismo permite obtener de forma exacta el punto de colapso de tensión incluyendo en las ecuaciones del flujo de carga la dependencia de la misma con la tensión. La metodología implementada permite obtener a partir de un caso base el punto de colapso de tensión asociado a bifurcaciones de nodo-silla. Además de esto permite el trazado de las curvas P-V y Q-V para todos los nodos del sistema.

A partir de una condición inicial de operación se busca el punto de máxima carga de la red mediante la ecuación (7).

$$P_f = P_i + \lambda_0 P_i \quad (7)$$

Donde:

P_f es la potencia total obtenida al aumentar la carga.

P_i es la potencia inicial de la carga.

Si al ejecutar el flujo de carga existe convergencia se busca un nuevo valor de P_f siendo ahora P_i la P_f anterior y así se repite el proceso hasta que existan problemas de convergencia. En este punto se reduce el paso hasta que este sea menor que la tolerancia definida por el usuario. La reducción del incremento de carga se realiza de acuerdo con la ecuación (8).

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_0}{2} \quad (8)$$

Donde:

λ_0 es el incremento inicial de carga.

Cuando se encuentra la solución final es necesario determinar la reserva de carga según la ecuación (9).

$$R = \frac{P_f - P_i}{P_f} \cdot 100 \quad (9)$$

Variación de la generación en los nodos PV

Considerar que toda la potencia demandada por la carga se suministra por el nodo de balance puede hacer que se presenten problemas de convergencia asociados a estabilidad sincrónica antes de que se presente un problema de estabilidad de la tensión, además se aleja de lo que físicamente ocurre en un sistema eléctrico. Por eso se hace necesario también variar la potencia entregada por los nodos PV.

El incremento de la generación en los nodos con capacidad para entregar más potencia activa se hace de acuerdo a la ecuación (10).

$$\Delta P_{G_n} = \frac{(P_{MAX_n} - P_{G_n})}{\sum_{n=1}^n (P_{MAX_n} - P_{G_n})} * \Delta P_C \quad (10)$$

Donde:

ΔP_{G_n} es la variación de generación activa del generador n .

ΔP_C es la variación de la demanda activa total de la carga.

P_{MAX_n} la potencia activa máxima disponible del generador n .

P_{G_n} es la potencia activa generada por el generador n .

Como se observa en la ecuación (10), la potencia activa que toma cada generador depende de la reserva que tenga el mismo. Si se consideran los límites de potencia activa de las máquinas cuando alguna de estas llega a su valor máximo se fija en el valor máximo y ya no se incrementa más su potencia activa.

Por el contrario si se desprecian los límites de potencia activa el comportamiento de cada máquina solo depende de su potencia activa máxima como lo describe la ecuación (11).

$$\Delta P_{G_n} = \frac{(P_{MAX_n})}{\sum_{n=1}^n (P_{MAX_n})} * \Delta P_C \quad (11)$$

Los límites de reactivo se consideran como tradicionalmente lo hacen los flujos de carga.

Análisis Modal

La aplicación del análisis modal es útil para determinar una vez alcanzado el punto de colapso las áreas críticas por estabilidad de la tensión y los elementos que más contribuyen a la ocurrencia del fenómeno. Para esto se determinan los valores propios y sus correspondientes vectores propios derecho e izquierdo. Un valor propio muy cercano a cero indica que el régimen se encuentra en un punto muy cercano al punto de colapso y un valor propio menor que cero indica que el régimen se encuentra en una zona inestable de tensión.

Factores de participación de los nodos

La participación relativa de la barra k en el modo i está dada por el factor de participación del nodo. Este se expresa en la ecuación (12):

$$P_{ki} = \xi_{ki} \eta_{ik} \quad (12)$$

Donde:

ξ_{ki} es el valor del elemento de la matriz de vectores propios izquierdo correspondiente al nodo k en el modo i .

η_{ik} es el valor del elemento de la matriz de vectores propios derecho correspondiente al nodo k en el modo i .

Los factores de participación de los nodos determinan las áreas asociadas con cada modo. La suma de todos los factores de participación en cada nodo es igual a uno pues los vectores propios derecho e izquierdo han sido normalizados. El valor del factor de participación determina la efectividad de las medidas aplicadas en ese nodo.

Existen generalmente dos tipos de modos. El primero es con pocos nodos con valores altos de factores de participación y el resto de los nodos con valores cercanos a cero. Esto indica que el problema de estabilidad de tensión se encuentra muy bien localizado. El otro modo es con muchos nodos con valores similares y el resto cercano a cero, indicando en este caso que el problema no está bien localizado y el problema de tensión involucra a gran parte del SEP.

Factores de participación de los elementos series

El factor de participación de los elementos series está dado por la ecuación (13)

$$P_{ji} = \frac{\Delta Q_{perd_j}}{\Delta Q_{perd_{MÁXIMO}}} \quad (13)$$

Donde:

ΔQ_{perd} variación de pérdidas de reactivo en el elemento j

$\Delta Q_{perdmaximo}$ variación máxima de pérdidas de todos los elementos series.

Los factores de participación de los elementos series indican que elemento consume mayor potencia reactiva en respuesta a un incremento de la demanda de reactivo de la carga. Elementos con altos factores son considerados elementos importantes o elementos fuertemente cargados. Estos factores permiten la adopción de medidas que eviten o alivien el colapso de tensión y además pueden ser usados para la obtención de un ordenamiento de contingencias.

Factores de participación de los generadores

La determinación de los factores de participación de los generadores es similar a la de los elementos series, en este caso se obtienen las variaciones de ángulo y la tensión de cada máquina para obtener la variación de potencia reactiva. Por tanto el factor de participación de los generadores está dado por la ecuación (14).

$$P_{mi} = \frac{\Delta Q_{Gm}}{\Delta Q_{G_{MÁXIMO}}} \quad (14)$$

Donde:

ΔQ_{Gm} variación de la entrega de reactivo en la máquina m

$\Delta Q_{Gmaximo}$ variación máxima de todas las máquinas.

Este factor indica que generadores entregan mayor potencia reactiva en respuesta a una variación de la misma en el sistema. Son útiles para determinar la mejor ubicación de la reserva de potencia reactiva por cada máquina para aumentar el margen a la estabilidad de tensión.

Pasos de la metodología para el análisis de la estabilidad de tensión

La metodología para la realización de estudios de estabilidad de tensión puede resumirse en los siguientes pasos:

- I. **Selección del caso base.** Modelación estática del SEP. Selección de los coeficientes que caracterizan la carga con la tensión.
- II. **Definición los principales parámetros de la simulación.** Incremento inicial de carga, la zona a variar, los generadores que aportarán potencia activa a los incrementos sucesivos de carga, la aplicación o no de las restricciones a los límites de reactivo de las máquinas y el error permisible del flujo sucesivo y los flujos de carga.
- III. **Selección de la condición crítica a obtener.**
 - 1) **Punto de máxima carga.** Se obtiene el estado de operación donde la carga en el sistema es máxima.
 - 2) **Punto de bifurcación estática o punto crítico por estabilidad de tensión.** Permite obtener el límite de estabilidad del sistema. Para cargas variables con la tensión no coincide con el punto de máxima carga.
 - 3) **Zona inestable de la curva P-V.** Permite el trazado completo de la curva P-V.

Se han desarrollado tres algoritmos para la obtención de las condiciones críticas descritas anteriormente.

- Método basado en el NRAR.
- Método basado en el Newton Raphson Formal (NRF).
- Combinar ambos métodos. Una vez alcanzado el punto crítico con el NRAR pasar automáticamente a buscar soluciones con el NRF.

Para cada una de las variantes a estudiar existen diferentes criterios de parada.

1. **Obtención del punto de máxima carga.** El criterio de parada responde a un decremento de la potencia activa en la iteración siguiente.
 2. **Obtención del punto crítico por estabilidad de la tensión.** El criterio de parada se basa en el índice de las sensibilidades V-Q. Se incrementa la carga hasta que una de las sensibilidades V-Q de los nodos sea negativa.
 3. **Obtención de la región inestable de la curva P-V.** El criterio de parada se basa en tres aspectos:
 - Cuando la tensión sea menor que el 10 % del valor nominal.
 - Cuando la potencia activa de alguno de los nodos de carga sea despreciable.
 - Cuando el factor del incremento de carga (λ) sea menor que la tolerancia definida para el flujo sucesivo.
- IV. **Análisis modal.** Se determinan los valores propios asociados a tres modos dominantes ordenados de menor a mayor valor. Se calculan:
- a) **Factores de participación de los nodos.** Permiten determinar las áreas críticas y los nodos de mayor participación en la estabilidad de la tensión.
 - b) **Factores de participación de los elementos series.** Permite elaborar un ordenamiento de contingencias por estabilidad de la tensión. Además permite identificar posibles elementos para la toma de medidas correctivas.
 - c) **Factores de participación de los generadores.** Permite identificar la mejor ubicación para la reserva de reactivo y muestra los generadores que alcanzan sus límites de reactivo.
 - d) **V.Resultados tabulares.** Brinda información valiosa sobre el SEP.

RESULTADOS OBTENIDOS

Análisis del esquema New England IEEE-39 nodos

En el desarrollo de algoritmos para el análisis de la estabilidad de tensión a menudo se utilizan las comparaciones con el esquema patrón de 39 nodos de la IEEE. Este sistema cuenta con 10 generadores, 34 líneas de transmisión y 12 transformadores. El esquema se muestra en la figura 1.

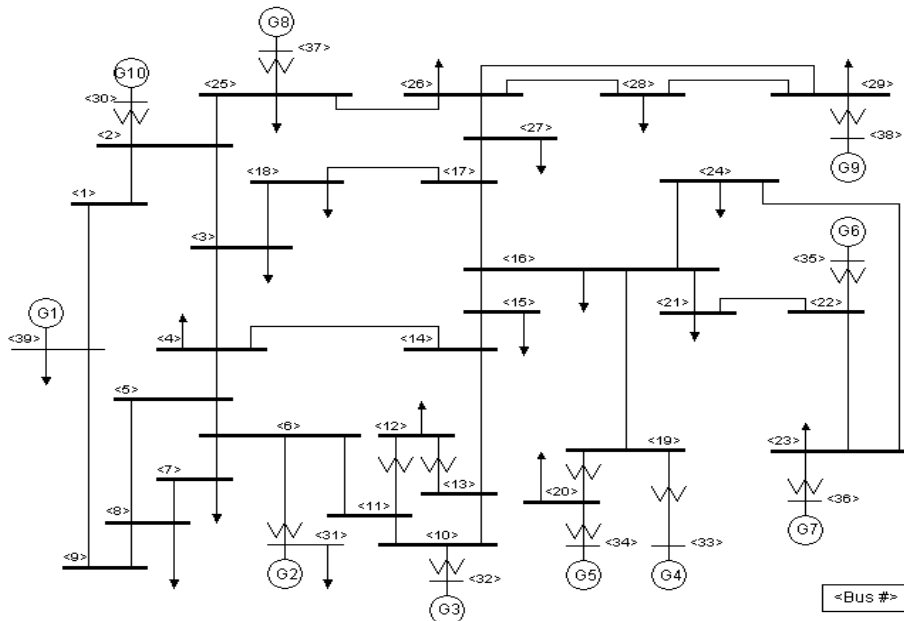


Fig. 1. Esquema New England 39 nodos.

Simulación del Caso Base

Se simuló el comportamiento del sistema para el caso base en el PSAT, software de amplio prestigio internacional, descrito en [8], y los resultados fueron comparados con los obtenidos por el flujo sucesivo implementado en el PSX. Los resultados de las comparaciones realizadas son mostrados en la tabla 1. La comparación se realiza en cuanto al incremento de carga (λ) y este incremento se obtiene tomando como patrón el software PSAT y analizando el caso con el flujo sucesivo implementado que se basa en la técnica NRF.

Tabla 1. Resultados para los casos bases analizados.				
Caso	PSAT (λ)	PSX (λ)	F	Error (%)
Caso Base sin considerar límites de activo y reactivo	2.1524	2.1889		- 1.69
Caso Base sin considerar límites de activo y considerando límite de reactivo	1.9938	2.0168		-1.15
Caso Base considerando límites de activo y reactivo	1.634	1.634		0.00

Análisis de contingencias

De igual forma se realizaron simulaciones de salida de elementos del sistema. Los resultados de λ para cada caso se muestran a continuación (tabla 2). Se observa que los errores obtenidos son muy bajos con valores muy cercanos a uno o inferiores.

Tabla 2. Resultados para las contingencias estudiadas.			
Caso	PSAT (λ)	PSX (λ)	Error (%)
Línea 7-8 fuera de servicio(C1)	1.9661	1.9896	-1.2
Línea 6-7 fuera de servicio(C2)	1.8505	1.8628	-0.66
Línea 5-6 fuera de servicio(C3)	1.8619	1.882	-0.56
Línea 5-8 fuera de servicio(C4)	1.9134	1.9325	-1.0
Generador 9 (830 MW) fuera de servicio(C5)	1.377	1.3642	0.93
Línea 5-8 y generador 9 fuera de servicio(C6)	1.3571	1.3588	-0.125

Las tablas 1 y 2, muestran que se logran excelentes resultados con la metodología propuesta y que los resultados del flujo sucesivo implementado son comparables con los del flujo continuado implementado en PSAT.

CONCLUSIONES

Se desarrolló una metodología que permite la obtención de los límites de estabilidad de la tensión y determina los principales elementos del SEP que participan en el problema; constituyendo una información muy valiosa para los operadores y los especialistas en planeamiento del sistema, en la toma de medidas que alejen el punto de operación del punto de colapso de tensión y de los límites de transferencia por los enlaces del SEN. La técnica propuesta conjuga buena exactitud con soluciones rápidas para estudios prácticos.

Se perfeccionan los métodos de flujos de carga sucesivos basados en el Newton Raphson Formal para la determinación del punto de colapso de tensión, evitando las singularidades de la matriz jacobiana en éste punto. Se implementa un flujo sucesivo basado en las técnicas que mantienen la jacobiana constante en cada iteración alcanzando soluciones con muy buena exactitud para aplicaciones prácticas. La metodología implementada tiene en cuenta la dependencia de la carga con la tensión, permitiendo la obtención de puntos críticos más cercanos a la realidad, el punto límite por estabilidad de la tensión, el punto de máxima carga del sistema eléctrico y el trazado completo de la curva P-V.

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]. MILANO F., "Continuous Newton's Method for Power Flow Analysis" *.IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, vol. 24, n.1, p. 50-57.

- [5]. REIS, C. *et al.*, “A comparison of voltage stability indices”.*IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*. 2006. p. 1007-1010.
- [6]. 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.
- [7]. GARCIA SANCHEZ, Zaid,. “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.
- [8]. MILANO, F., “An Open Source Power System Analysis Toolbox”. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2005, vol. 20, n. 3, p. 35-42.

AUTORES

Zaid Garcia Sánchez.

Ingeniero Electricista, Máster en Ciencias, Doctor en Ciencias, Profesor Asistente, 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@elecvccl.une.cu.

Grettel Quintana de Basterra

Ingeniera Electricista ,profesora de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas,Cuba
e-mail: gqdebasterra@uclv.edu.cu.

Juan Gualberto Boza Valerino.

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