



Aplicación de flujos de cargas sucesivos con jacobiana constante para la determinación del punto de colapso de tensión. Validación con patrón IEEE-14

Application of successive power flows with constant jacobian to obtain the point of voltage collapse. Test with IEEE-14 bus

Zaid García - Sánchez

José Antonio González-Cueto - Cruz

Juan Gualberto Boza - Valerino

Recibido: Octubre del 2010

Aprobado: Noviembre del 2010

Resumen/ Abstract

Este trabajo presenta un método de solución para el análisis estático de las inestabilidades de tensión. El principal aporte del trabajo es la obtención de la región inestable de la curva P-V utilizando flujos sucesivos basados en un método Newton con jacobiana constante que mantiene los lazos de acoplamiento P-V y Q- δ . El algoritmo se implementó en el paquete de programas PSX, se modela la carga dependiente del voltaje, los límites de potencia activa y reactiva de las máquinas y la variación de la generación de potencia activa de los nodos P-V teniendo en cuenta la reserva de cada máquina que participa en la variación de generación. Se comparan los resultados con un flujo continuado implementado en el software PSAT para el patrón de 14 nodos de la IEEE. Para ambos casos se obtienen resultados muy similares, comprobándose así la exactitud obtenida con la técnica implementada.

Palabras clave: Estabilidad de voltaje, métodos estáticos, margen de carga, Flujo sucesivo

This paper presents a solution method for tension instability static analyses. The main contribution of this research is the determinations of the unstable part of P-V curve using a multiple power flow based on the Newton method with constant Jacobian that keeps the links between P-V and Q- δ . This algorithm was implemented within PSX program, the load is modeled as voltage dependent and the limits of active and reactive power of the machines, plus the variation of P-V node generation, taking into account the reserve in each node. The result are compared with a continuation power flow implemented in PSAT software for a grid of 14 nodes patron. In both cases the result are very similar verifying the exactitude of the program developed.

Keywords: voltage stability, static methods, load range, future flow

INTRODUCCION

La estabilidad de tensión ha sido desde la década de los 60s un tema de gran importancia debido a los fenómenos de este tipo ocurridos alrededor del mundo. Todos estos eventos dieron origen a investigaciones y propuestas de métodos de estudio para detectar y predecir la inestabilidad con buena precisión y confiabilidad. La realización de estos estudios requiere de gran cantidad de datos de los elementos que componen la red eléctrica, con los cuales se desarrollan técnicas computacionales adecuadas; sus resultados muestran los estados del sistema, márgenes a la inestabilidad de tensión y límites de operación, con los cuales se definen las acciones de prevención y corrección del problema. Varias técnicas de estudio han sido desarrolladas y descritas en varios artículos [1- 9]. Estas pueden ser clasificadas según el tipo de análisis a realizar en técnicas estáticas y técnicas dinámicas.

El fenómeno se ha estudiado frecuentemente en su mayoría por la vía de la simulación del flujo de potencia. En los casos del estado estable, la mayoría de los indicadores del colapso de voltaje están basados en la viabilidad del flujo de carga o estabilidad del estado estable, pueden encontrarse ejemplos de este acercamiento en las referencias [5, 7, 8] donde el colapso de voltaje se explica como un fenómeno de la bifurcación estática.

La referencia [8] muestra que bajo ciertas condiciones, el análisis de colapso de voltaje estático y los acercamientos dinámicos llevan a resultados similares, sin embargo al realizar un análisis estático se requiere un tiempo computacional más pequeño.

El análisis estático es ideal para los estudios en los cuales los límites de la estabilidad de voltaje, para pre-contingencia y de post-contingencia, deben ser determinados. Las ediciones dinámicas, tales como problemas transitorios de estabilidad angular de la primera oscilación se han tratado normalmente usando programas transitorios de estabilidad. Estos programas incluyen ordinariamente los modelos dinámicos de la máquina sincrónica, con sus sistemas de excitación, turbinas y gobernadores, así como otros modelos dinámicos, tales como cargas, Enlaces de transmisión a corriente directa (HVDC), compensadores estáticos de reactivo (SVC por sus siglas en inglés) y otros dispositivos rápidos. Con la evolución moderna, en los sistemas de potencia fuertemente compensados, la estabilidad de tensión ha emergido como la consideración limitadora en muchos sistemas. El fenómeno del colapso de tensión es dinámico, pero se desarrolla a frecuencia muy lenta, incompatible la mayoría de las veces con la perspectiva de un programa transitorio de la estabilidad.

Varias han sido las investigaciones para la obtención de algoritmos que permitan obtener con buen grado de exactitud el punto de colapso de voltaje. Este artículo presenta un flujo sucesivo que permite obtener el punto exacto y además puntos inestables de operación, se basa en una técnica que mantiene la jacobiana constante y que tiene en cuenta la modelación de la carga variando con el voltaje. Al mantenerse la jacobiana constante, esta nunca se hace singular y además al formarse y factorizarse una sola vez se gana en velocidad de cálculo con respecto a las técnicas basadas en el Newton Raphson formal. Se muestra además la validación del flujo implementado comparando los resultados obtenidos con el flujo continuado implementado en el software PSAT validado contra software de prestigio internacional.

EI MARGEN DE CARGA

El margen de carga es el índice básico y más ampliamente aceptado para el colapso de tensión [2, 3, 5, 6, 7, 8, 9]. Para un punto de funcionamiento en particular, la cantidad de carga adicional que causaría un colapso de tensión se denomina margen de carga al mismo. Si la carga del sistema se elige como el parámetro que varía, entonces se puede dibujar una curva PV del sistema, en la que, el margen de carga al colapso de tensión es la diferencia entre las cargas en el punto de funcionamiento y en la "nariz" de la curva. A menudo se supone que las cargas tienen factor de potencia constante y en este caso el cambio en la carga puede medirse por el cambio en la potencia real.

Las ventajas del margen de carga como índice de colapso de tensión son las siguientes:

- El margen de carga es directo, generalmente aceptado y se entiende fácilmente.
- El margen de carga no está basado en un modelo de sistema en particular, se requiere solamente un modelo de sistema eléctrico estático. Puede usarse con modelos de sistemas dinámicos, pero no depende de los detalles de la dinámica.
- El margen de carga es un índice seguro que tiene en cuenta la no linealidad del sistema y los límites de potencia reactiva. Los límites no se reflejan directamente como cambios bruscos en el margen de carga.
- Una vez que se determina el margen de carga, es fácil y rápido calcular su sensibilidad con respecto a cualquier parámetro del sistema [6- 7].
- El margen de carga considera el modelo de incremento de carga.

Es importante señalar el hecho de que los límites de los dispositivos no están directamente reflejados como cambios en el perfil del margen de carga, ya que estos límites están ya incluidos en los cálculos. Así pues, a diferencia de

otros índices, las estimaciones de las distancias al colapso basadas en este índice son exactas. Sin embargo, los operadores no pueden usar los cambios en el índice para evaluar directamente el efecto relativo de los límites de los dispositivos sobre el margen de carga y, en consecuencia, iniciar algunas medidas correctivas.

Por el contrario, las desventajas del margen de carga como índice de colapso de tensión son:

- El margen de carga requiere determinar puntos alejados del punto de funcionamiento y, por lo tanto, requiere un mayor esfuerzo de cálculo que los índices que sólo usan la información del punto de funcionamiento.
- El margen de carga precisa una dirección de incremento de carga. En algunas ocasiones esta información no está disponible.

MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL MARGEN DEL CARGA

Los primeros pasos para la determinación del margen de carga fueron técnicas basadas en la solución sucesiva de flujos de potencias, el punto de máxima carga se asocia con la singularidad de la matriz jacobiana del sistema y por tanto estas técnicas dejaban de converger cerca del punto máximo [4- 8]. Aparece entonces en la literatura el método de flujo continuado, resolviendo los problemas de singularidad de la matriz jacobiana y permitiendo así la obtención del punto exacto de colapso de voltaje y además soluciones por la parte inestable de la curva P-V.

Según [6 -8] los resultados del flujo continuado y del método basado en la solución de flujos de cargas múltiples son prácticamente iguales en la parte de arriba de la curva de la figura 1, es decir se puede obtener entonces el punto crítico con tan buena exactitud como si se empleara un flujo de continuación.

Los métodos de continuación son robustos y flexibles, son ideales para la resolución de casos donde la convergencia de los flujos de carga falla. Sin embargo son muy lentos e implican un alto costo computacional para encontrar la solución. Varias investigaciones se han dedicado a mejorar la velocidad de cálculo. En [6] se expresa que una variante ideal sería el buscar los puntos de solución de la parte estable de la curva P-V con flujos sucesivos y cuando estos dejen de converger utilizar entonces los flujos continuados para determinar el punto exacto y las soluciones en la parte inestable de la curva.

Generalmente las curvas P-V se usan para observar el comportamiento de la tensión en la carga de una barra con respecto al aumento o disminución de la potencia activa en el mismo nodo.

Las curvas P-V son útiles en el estudio de estabilidad de tensión porque indican el punto de máxima cargabilidad del nodo que se está estudiando en la cual denota una inestabilidad de tensión o colapso de tensión. En la fig.1, se ilustra mediante curvas P-V una situación de inestabilidad de tensión para un estado de carga, al ocurrir una contingencia.

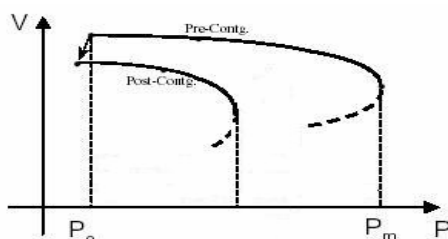


Fig.1 Curvas P-V.

Como se aprecia en la figura el límite de carga se ve afectado por la ocurrencia de una contingencia, si se toma como límite máximo de carga el correspondiente al punto P_m , es decir el que se obtiene al realizar el análisis para un caso en operación normal o pre-contingencia.

Basado en la investigación original informada en [5, 6, 8] el análisis de estabilidad de tensión no enfoca directamente el límite de cargabilidad, sino brinda la distancia que separa el estado de equilibrio estable del inestable. Así la distancia entre ambos puntos proporciona una medida de la proximidad a la inestabilidad. Un problema al aplicar este método es cómo obtener el punto inestable más crítico, es posible que existan varias condiciones de operación que pueden conllevar a un colapso de tensión.

INFLUENCIA DE LA MODELACIÓN DE LA CARGA

Varias han sido las investigaciones en el tema de la modelación de la carga para estudios en SEP [10 - 13]. La estabilidad de tensión, también conocida como estabilidad de la carga, necesita que se modele la carga lo más detalladamente posible. En la figura 2 se muestra la curva P-V de una línea a factor de potencia constante.

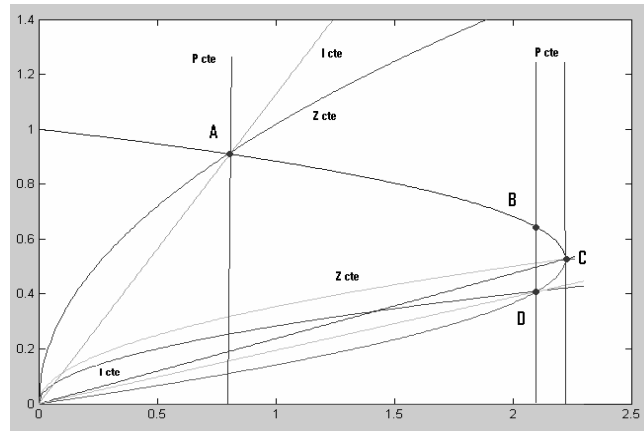


Fig 2. Curva P-V de una línea.

En la figura solo se han representado los tres tipos de carga más comúnmente usados, potencia constante (P cte.), corriente constante (I cte.) e impedancia constante (Z cte.). El punto **A** es la carga inicial, donde se aprecia que tanto la característica I cte. como Z cte. interceptan a la curva P-V en un solo punto, por el contrario la característica P cte. corta la curva en 2 puntos, uno en la parte estable y el otro en la parte inestable. Los flujos de carga rápidos permiten obtener el punto de la parte estable, mas no el de la inestable, pues arrancan con valores de tensiones cercanos a 1 p.u. En el punto **B** se han estresado las condiciones de operación y se mantienen las mismas condiciones del punto **A**, ya el punto **C** es el punto de máxima cargabilidad del sistema, también conocido como punto de la nariz o punto de bifurcación estática. Aquí los dos puntos de equilibrio pertenecientes a la característica P cte. desaparecen y se unen en este punto. Las características I cte. y Z cte. tienen solución en este punto.

Cualquier otro incremento de carga a P cte. no tiene solución, por el contrario para el caso de los modelos que consideran la carga dependiente de la tensión, se obtienen puntos de solución por la parte inestable de la curva.

Según la referencia 7 considerar la carga como P cte. es válido en sistemas fuertemente compensados y donde los “taps” de los transformadores no estén bloqueados o no hayan alcanzado sus límites. Aunque la mayoría de los programas de flujos consideran la carga como P cte., un mayor acercamiento a la realidad se produce considerando las variaciones de esta con el tensión.

FLUJO DE CARGA UTILIZADO

El flujo de carga utilizado es un Newton Acoplado Rápido. En [14] se presenta este flujo que mantiene la jacobiana constante pero a diferencia del método desacoplado rápido mantiene los lazos de acoplamiento entre P-δ y Q-V. Esto hace que no se vea afectado por las relaciones X/R de la red, manteniéndose las buenas características de convergencia y la rapidez de solución del desacoplado rápido.

Este flujo fue desarrollado en el Centro de Estudios Electroenergéticos de la Universidad Central de Las Villas siguiendo los criterios utilizados para el flujo rápido desacoplado, pero manteniendo en la jacobiana las variaciones de potencia activa con la tensión y las variaciones de la potencia reactiva con el ángulo, utilizando para estas variaciones términos constantes que dependen de las conductancias de las ramas. De las expresiones originales del Newton-Raphson formal se calculan estos términos aproximando a cero, los ángulos de desfase de las tensiones en los extremos de las ramas y tomando como 1 p.u., los valores de estos ángulos. Suposiciones idénticas a las del flujo rápido desacoplado.

Aplicando todas las suposiciones antes vistas y optando por el esquema de errores de corriente el problema queda formulado de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{p-1} / V^{p-1} \\ \Delta Q^{p-1} / V^{p-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B^{serie} & G^{total} \\ G^{serie} & B^{total} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^p \\ \Delta V^p \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

quedando los errores de corriente:

$$\frac{\Delta P_k}{V_k} = \frac{P_k^{sp}}{V_k} - \frac{P_k}{V_k} = \frac{P_k^{sp}}{V_k} - \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (1)$$

$$\frac{\Delta Q_k}{V_k} = \frac{Q_k^{sp}}{V_k} - \frac{Q_k}{V_k} = \frac{Q_k^{sp}}{V_k} - \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2)$$

Las submatrices serie y total, se forman despreciando o teniendo en cuenta las ramas paralelo de la red, respectivamente.

A pesar de la muy buena característica de convergencia de este método existen múltiples técnicas para mejorarla. Las tres acciones más conocidas son:

- Limitar los incrementos de voltaje y ángulo en cada iteración.
- Seleccionar buenos valores de arranque. Generalmente se emplea el arranque plano $1+j0$ para los nodos PQ y $V+j0$ para los PV. Si se conocen valores anteriores pueden usarse, ya que generalmente se obtienen convergencias más rápidas.
- Los controles de reactivo en los nodos PV son adicionados al algoritmo de FC después de haberse alcanzado una convergencia inicial.

De forma general las propiedades de convergencia de este flujo son muy buenas presentando una característica geométrica.

Puesto que en los estudios de estabilidad de tensión se hace necesaria la modelación detallada de la red, llegando incluso a niveles de tensiones donde la relación X/R pudiera ser una limitante para la obtención de la convergencia del flujo, este flujo resulta ventajoso para estos fines.

MODELACIÓN DE LA CARGA

Mucho de los programas para el análisis de la inestabilidad de voltaje consideran la carga constante, en el implementado en el PSX se utiliza un modelo de carga exponencial descrito por la ecuación (3).

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{np} \quad (3)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{nq}$$

Este modelo permite además de los modelos tradicionales ya vistos en la figura 2, coeficientes diferentes para valores de np y nq en dependencia de los valores que caractericen a la carga real conectada al nodo. Diferentes valores de estos coeficientes hacen que la variación de las potencias activa y reactiva con el voltaje no sea la misma, logrando entonces así una variación del factor de potencia de la carga.

VARIACIÓN DE LA POTENCIA GENERADA POR LOS GENERADORES

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 inestabilidad sincrónica antes de que se presente un problema de inestabilidad de 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 (4).

$$\Delta P_{G_n} = \frac{(P_{MAX_n} - P_{G_n})}{\sum_{n=1}^n (P_{MAX_n} - P_{G_n})} \Delta P_C \quad (4)$$

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 4 la potencia activa que toma cada generador depende de la reserva que tenga éste. Si se consideran los límites de potencia activa de las máquinas cuando alguna de éstas llega a su valor máximo se fija en este 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 5.

$$\Delta P_{G_n} = \frac{(P_{MAX_n})}{\sum_{n=1}^n (P_{MAX_n})} \cdot \Delta P_C \quad (5)$$

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

ALGORITMO DEL FLUJO SUCESIVO

A partir de una condición inicial de operación se busca el punto de máxima cargabilidad de la red, según la ecuación 6:

$$P_f = P_0 + \lambda_0 \cdot P_0 \quad (6)$$

Donde P_0 representa la carga inicial de régimen y P_f la inicial para la primera iteración del flujo sucesivo. Si al ejecutar el flujo existe convergencia se busca un nuevo valor de P_f , siendo ahora P_0 la P_f anterior y así se repite el proceso hasta que existan problemas de convergencia. En el punto donde el flujo de carga diverge se va reduciendo 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 7

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_0}{2} \quad (7)$$

Cuando se encuentra la solución final es necesario determinar la reserva de carga según la ecuación 8.

$$R = \frac{P_f - P_0}{100} \quad (8)$$

Una descripción gráfica del algoritmo se hace en la figura 3. En cada una de las iteraciones se hace una corrección de los valores de potencia de la carga así como un reajuste en dependencia de esta variación de las potencias activas generadas por cada una de las unidades que varían su generación.

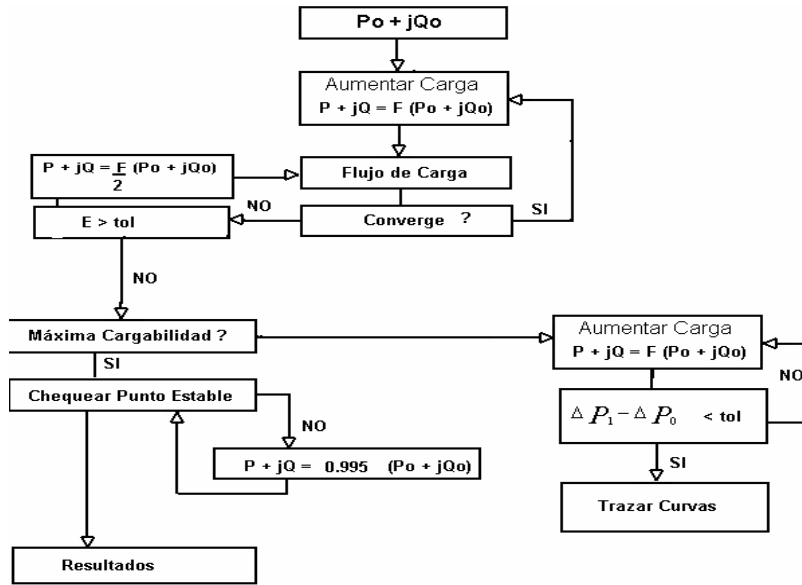


Fig. 3 Algoritmo del flujo sucesivo.

VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL ESTUDIO IMPLEMENTADO. DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA CARGABILIDAD DE UNA SOLA LÍNEA.

El primer paso de la validación fue la comprobación de los resultados obtenidos con el programa simulando un esquema que solo contenga un generador, una línea de transmisión y una carga. Se varía la carga hasta que se encuentre la máxima potencia que se puede transferir por la línea.

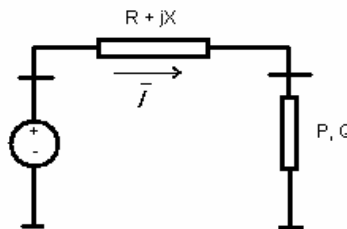


Fig. 4 Representación circuital.

Para cada valor de tensión de envío y de factor de potencia de la carga en el recibo de una línea, se puede entregar una potencia activa máxima, a la cual corresponde un valor de tensión de recibo. Para cada uno de los valores inferiores a esta potencia máxima de recibo, existen dos valores de tensión de recibo posibles para la operación de la línea, de los cuales el mayor se corresponde con una condición de operación estable, mientras que el menor corresponde a una condición de voltaje inestable, caracterizada por una respuesta de reducción de este tensión a un aumento de generación de potencia reactiva en el recibo, así como por valores de pérdidas de potencia activa y reactiva en la línea, superiores a los de la condición estable. Por lo que la potencia máxima antes mencionada establece el límite de operación de tensión estable en el nodo de recibo de la línea.

En la referencia 15 se realiza un análisis detallado del comportamiento de una línea de transmisión y la obtención de la máxima carga que se puede suministrar a través de la misma por inestabilidad de voltaje. De [15] a partir de la ecuación:

$$\overline{V_e} = \overline{A} \overline{V_r} + \overline{B} \overline{I_r}$$

donde

$$A = A_r + jA_i$$

$$B = R + jX_i$$

V_e , V_r e I_r son tensión de envío, tensión de recibo y corriente de recibo de la línea.

$$P_{C_{m\acute{a}x}} = \frac{b_p - \sqrt{b_p^2 - 4a_p V e^4}}{2a_p} \tag{9}$$

Donde:

$$b_p = (4V e^2 (Ar(R + X_L \text{tg}(\Phi)) + Ai(X_L - R \text{tg}(\Phi)))) \tag{10}$$

y

$$a_p = 8ArAi(R + X_L \text{tg}(\Phi))(X_L - R \text{tg}(\Phi)) - 4((Ai(R + X_L \text{tg}(\Phi)))^2 + (Ar(X - R \text{tg}(\Phi))))^2 \tag{11}$$

Los datos de la línea utilizada son:

R = 6.05 Ω. , X = 12.1 Ω pu. y Bc= 165,6 μs.

Los resultados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados del esquema simple				
Método	FP	P (MW)	Tensión Límite (kV)	Error (%)
Línea	0.896	222.43	58.028	
PSAT	0.896	220.96	59.2	0.67
PSX	0.896	222.41	58.032	0.01

Como se aprecia en la tabla se logran resultados muy similares en los tres casos.

La curva P-V del sistema se muestra en la figura 5.

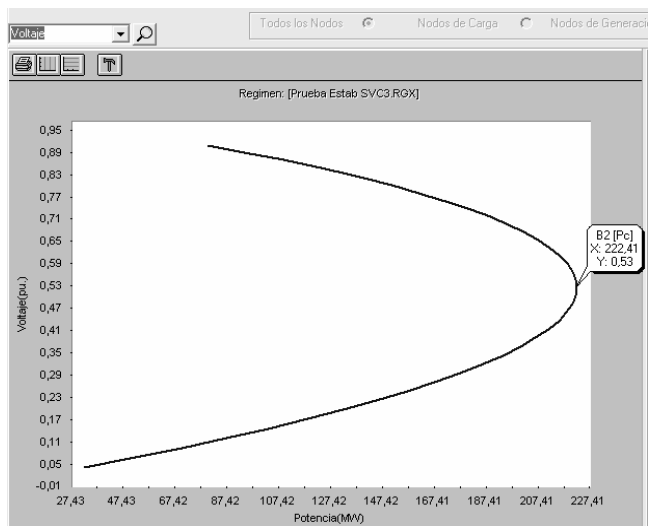


Fig. 5. Curva P-V de la carga.

DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA CARGABILIDAD DE LA RED DE 14 NODOS DE LA IEEE

Se simularon dos condiciones de operación para el esquema de prueba de 14 nodos de la IEEE, figura 6. La primera sin considerar los límites de potencia activa y reactiva de los generadores y compensadores estáticos y el segundo modo de operación fue considerando estos límites.

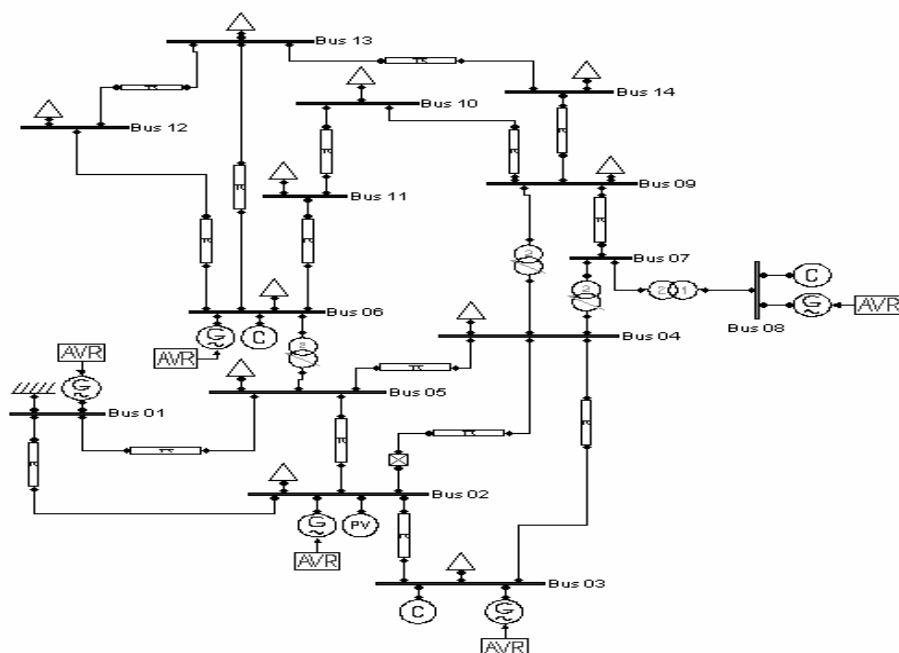


Fig. 6. Sistema IEEE- 14 nodos

OBTENCIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA CARGABILIDAD SIN CONSIDERAR LOS LÍMITES DE REACTIVO

Se realizaron corridas de flujo continuado con el PSAT y de flujo sucesivo con el PSX con el objetivo de obtener el punto de máxima cargabilidad de la red manteniendo el factor de potencia constante. Los resultados generales y un desglose por nodos se muestran en la tabla 2. Las tolerancias del flujo de carga y del flujo sucesivo del PSX y flujo continuado del PSAT fueron de 0.00001 MVA para cada caso.

Tabla 2. Potencia en los nodos sin considerar los límites de potencia reactiva de los generadores y compensadores sincrónicos.

	PSAT	PSX	
Nodo	P(MW)	P(MW)	Dif
Totales	1024.06	1026.4	2.34
2	85.8	86.02	0.10
3	372.5	373.39	0.19
4	188.99	189.47	0.48
5	30.05	30.13	0.08
6	44.28	44.4	0.12
9	116.63	116.93	0.17
10	35.58	35.67	0.06
11	13.84	13.88	0.04
12	24.12	24.28	0.16
13	53.38	53.91	0.53
14	58.91	59.06	0.15

Se observa que los resultados de ambos flujos son muy similares, con ligero valor de carga máxima superior para los resultados obtenidos con el PSX, pero en todos los casos con errores menores a 1%. El margen de carga determinado fue de 2, 834 veces la potencia inicial.

En la práctica uno de los limitantes de estos análisis de inestabilidades de tensión es el alcance por parte de los elementos del sistema encargados de suministrar la potencia reactiva de sus límites de entrega, esto hacer que se reduzca apreciablemente el margen de carga.

OBTENCIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA CARGABILIDAD CONSIDERANDO LOS LÍMITES DE REACTIVO

Los resultados en el punto de máxima cargabilidad se muestran a continuación, la tolerancia del flujo continuado del PSAT fue de 0.00001 MVA al igual que la del flujo de carga, considerándose tanto los límites de potencia activa como de potencia reactiva de las máquinas. Para una carga inicial de 259 MW y 81,4 Mvar con el PAST se logra llegar a valores de 445,8 MW y 140,13 Mvar. Esto da un incremento de carga de 1,7211 veces la potencia inicial.

El mismo caso fue simulado en el PSX, corriendo el flujo sucesivo para iguales valores de tolerancia y para las mismas restricciones que el caso corrido con el PSAT y los resultados fueron 448,9 MW y 141,1 Mvar para un incremento total de carga de 1,7332 de la inicial. La carga se consideró como carga de potencia constante manteniéndose así el factor de potencia de la carga igualmente constante.

Tabla 3. Potencia en los nodos considerando los límites de potencia reactiva de los generadores y compensadores sincrónicos.

	PSAT	PSX	
Nodo	P(MW)	P(MW)	Dif (MW)
Totales	445,8	448,9	3,1
2	37,38	37,6	0,22
3	163	163,3	0.3
4	82,52	82,8	0.28
5	12,9	13,2	0.3
6	19,2	19,4	0.2
9	50,7	51,1	0.4
10	15,29	15,6	0.31
11	5.88	6,1	0.22
12	10,24	10,6	0.36
13	23,06	23,4	0.34
14	25,63	25,8	0.17

Como se aprecia en la tabla 3 se obtienen valores para los dos programas prácticamente idénticos con un error de 0,7 %. En la figura 7 se muestran las curvas P-V para este caso en el PSX. La no representación de la parte inestable de la curva se debe a que se modeló para este caso la carga a potencia constante para poder compararla con los resultados obtenidos con el PSAT que solo modela este tipo de carga.

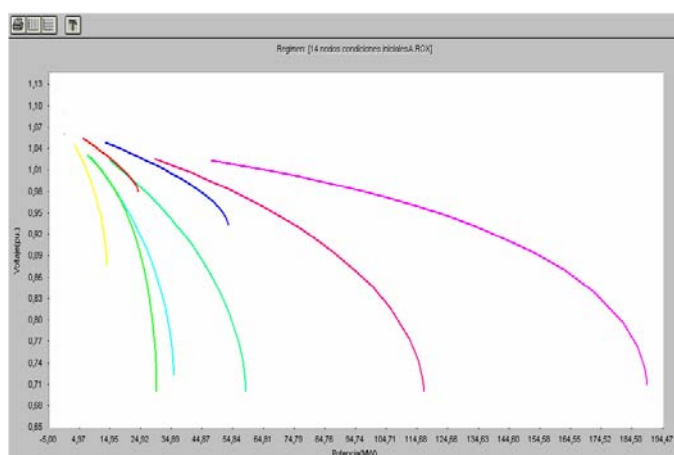


Fig. 7. Curvas P-V de los nodos de carga del esquema de 14 nodos de la IEEE. Programa PSX

La figura 8 muestra las curvas P-V obtenidas con el PSAT.

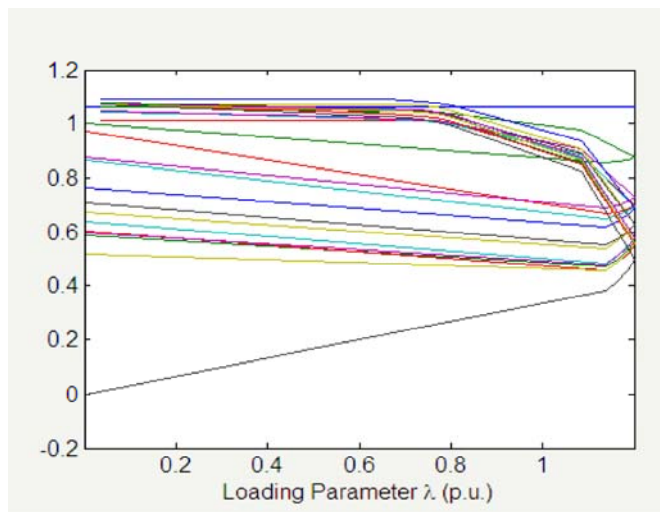


Fig. 8. Curvas P-V de los nodos de carga del esquema de 14 nodos de la IEEE. Programa PSAT.

El PSAT traza la curva de tensión contra λ que es el incremento de carga, para lograr las potencias por nodos es necesario multiplicar este valor por la carga inicial del nodo.

Este esquema patrón de la IEEE ha sido utilizado para la validación de índices y algoritmos de análisis de la inestabilidad de tensión. Una de las prácticas comúnmente usadas es la simulación de ocurrencia de contingencias. En [16-17] se analiza este esquema con las líneas 2-3 y 2-4 fuera de servicio.

La siguiente tabla ofrece los valores comparativos de los resultados descritos en la bibliografía y el método implementado en el PSX.

Tabla 4. Comparación de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas.				
Contingencia	Bibliografía (MW)	PSX (MW)	Dif (MW)	Error (%)
Ninguna	445,8	448,9	3,1	0,7
L 2-4	399,5	400,7	1,2	0,3
L 2-3	332,5	328,3	4,2	1,26

INFLUENCIA DE LA MODELACIÓN DE CARGA EN LA DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE COLAPSO DE TENSIÓN

El considerar la carga como potencia constante ha sido utilizado hasta ahora por la mayoría de los programas para el análisis de las inestabilidades de tensión, sin embargo esto pudiera determinar la obtención de puntos alejados de punto de máxima cargabilidad obtenido.

Mucho de los especialistas en la rama han dedicado varios estudios para la determinación de los coeficientes característicos de las cargas conectadas a un nodo. La siguiente tabla considera varios coeficientes de cargas con el objetivo de obtener que diferencia existente entre la consideración de la carga a potencia constante y determinar el punto máximo con los valores de p_v y q_v de la carga.

Tabla 5. Valores extremos de potencia activa y reactiva para cargas con coeficientes diferentes de 0.				
Tipo de carga	P(MW)	Q(MVAr)	FP	Error (%)
P cte	448,9	141,1	0.954	-----
l cte	462,3	143,9	0.954	2.98%
Z cte	461,3	143,6	0.954	2,94%
Residencial*	490,1	94	0.987	9,1%
Comercial**	483,8	100,4	0.979	7,82%
pv= 5 qv= 2	369,4	205,6	0.874	17,6 %
Varios coeficientes	460,9	135,3	0.959	2,7%

Se observa que pueden existir coeficientes que permitan obtener resultados demasiado alejados en la determinación del margen de carga.

Generalmente la estabilidad de tensión se asocia a la demanda de potencia reactiva de la carga, es por eso que coeficientes que mejoren el factor de potencia permiten obtener puntos extremos más alejados de la potencia inicial.

Las curvas P-V de los nodos de carga del ejemplo anterior se determinan considerando varios coeficientes. Figura 9.

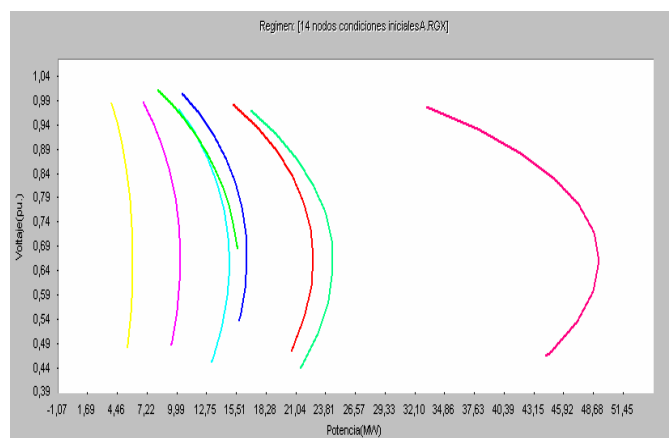


Fig.9. Curvas P-V de los nodos de carga del esquema de 14 nodos.

CONCLUSIONES

La dependencia de la carga con la tensión y el factor de potencia de la misma son determinantes en los problemas de inestabilidades de tensión. Por esto es necesario en los estudios considerar el tipo de carga, permitiendo así obtener valores de demanda máxima más cercanos a la realidad.

Se demostró que el flujo sucesivo basado en una técnica que mantiene la jacobiana constante permite llegar a puntos extremadamente cercanos al punto de colapso de tensión. Para los dos casos analizados los resultados arrojaron errores menores al 1 %. Por otra parte es posible obtener la región inestable de las características de P y Q vs. tensión, sin necesidad de recurrir a flujos de carga continuados, sino utilizando modelos de cargas variables con la tensión, más cercanos a la realidad.

El método implementado está siendo usado por el departamento de regímenes del Despacho Nacional de Cargas de Cuba con resultados satisfactorios.

REFERENCIAS

- [1] KUNDUR, P. "Definition and classification of power system stability". *IEEE transactions on power systems*: 19(2). 2004, . pp 1387-1401.
- [2] M. SANAYE-PASAND, Y. A. R.-Z. Review and Simulation of Static Indices in Detection of Proximity to Voltage Collapse. En: Australian Universities Power Engineering Conference. Australia. 2003.
- [3] A. SODE-YOME., N. M. Y. K. Y. L. "A maximum loading margin method for static voltage stability in power systems". *IEEE Transactions on Power Systems*: 21(2). 2006, nº. p. pp 799-808.
- [4] FORCE, E. T. *Voltage stability security assessment and on-line control*. technical report TR-101931, EPRI April 1993
- [5] TAYLOR., C. W. *Power System Voltage Stability*. Ed. McGraw-Hill . California, EEUU: 1994.
- [6] KUNDUR., P. *Power system stability and control*. Ed. McGraw-Hill, ed. California, EEUU,: 1994. pp. 1175.
- [7] CAÑIZARES., C. "Voltage stability assesement, procedures and guides". *IEEE/PES Power System Stability Subcommittee Special Publication*. 2001.
- [8] T. V CUTSEN, C., VOURNAS "Voltage Stability in Electric Power Systems". *Kluwer Academic Publishers*. 1998,.
- [9] R. B. PRADA, B. J. C. Assessment of steady state voltage collapse. En: *Proc. Of the Tenth Power System Computation Conference*. Graz, Austria,. August 1990. pp. 1189-1195.
- [10] CIGRE WG 38.02 Task Force No 10, "Modeling of voltage collapse including dynamic phenomena," technical report of task force 38-02-10, draft 3. CIGRE. June 1992.
- [11] L. AROMATARIS, P. A. Y. J. R. Estudio Dinámico de Estabilidad de Tensión comparando modelo de carga estática y carga dinámica. En: *IX Encuentro regional Latinoamericano de la CIGRE. Paraná*. Brasil. Mayo 2001.
- [12] M. SEDIGHIZADEH, A. R. "Dynamic Load Modeling for Khuzestan Power Systems Voltage Stability Studies". December 2007, vol. 26.
- [13] ROMERO, I. *Dinamic Load Model for Power System. Estimation of Time-Varing Parameters During Normal Operation*. Tesis Doctoral. Luna University. Sweden.
- [14] ZAMORA., S. *Flujo de Carga Acoplado Rápido con técnicas para orientar el análisis en caso de divergencia*. Tesis para optar por el grado de master en ciencias, Universidad Central de las Villas. Villaclara, Cuba, 1998
- [15] GONZÁLEZ-CUETO, J. A. *Líneas de transmisión*. Universidad Central de las Villas, Villa Clara. Cuba,,: 2009.
- [16] MILANO., F. Documentation for PSAT version 1.3.4. Julio 14,2005.
Consultado http://thunderbox.uwaterloo.ca/_fmilano
- [17] MILANO. F. "An Open Source Power System Analysis Toolbox". *IEEE Transactions on Power Systems*,. AUGUST 2005., vol.. 20, No. 3.

AUTORES

Zaid García Sánchez

Ingeniero Electricista Máster en Ciencias, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba.

e-mail: zaid@uclv.edu.cu

José Antonio González-Cueto Cruz.

Ingeniero Electricista , Master en Ciencias, Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

e-mail: jcueto@uclv.edu.cu o cueto@elecvccl.une.cu.

Juan Gualberto Boza - Valerino

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba.

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