



APLICACIÓN DE LA COMPUTACIÓN

Revisión sobre métodos matemáticos para el estudio de la estabilidad del voltaje en los sistemas eléctricos de potencia

A review on mathematics methods to study the voltage stability on electric power systems

Zaid García - Sánchez
Juan G. Boza - Valerino
Susana Leyva - Condeff

Recibido: Junio del 2008
Aprobado: Septiembre del 2008

Resumen/ Abstract

En Cuba desde la década del 70 se empezaron a desarrollar algoritmos para realizar el estudio de los regímenes estacionarios y transitorios del Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Particular énfasis se hizo sobre el desarrollo de algoritmos y programas para computadoras para realizar el estudio de la estabilidad transitoria. Actualmente se utiliza ampliamente el programa Power System Explorer (PSX), el que posee amplias facilidades para realizar estudios sobre regímenes estacionarios y transitorios de los sistemas eléctricos de potencia. A través de los estudios realizados para la planificación y la experiencia alcanzada sobre la explotación del SEN, con su estructura actual, se ha revelado la necesidad de estudiar en detalles los problemas relacionados con el voltaje, en particular el problema de la estabilidad del voltaje del SEN. En este artículo se realiza una primera revisión sobre algunos de los métodos matemáticos estáticos y dinámicos que se han desarrollado y que recoge la bibliografía sobre el tema de la Estabilidad del Voltaje en los Sistemas Eléctricos de Potencia.

Palabras claves: estabilidad, estabilidad transitoria, estabilidad de voltaje, métodos matemáticos

In Cuba, from the seventies of the past century, different algorithms to study stationary and transient regimes of the Cuban Electric System were developed. Those algorithms and computer programs were focused in the study of transient stability. Currently, we use widely the computer program "Power System Explorer" (PSX) which have a lot of facilities to make studies about stationary and transient regimes of electric power systems. Due to the studies about planning of electric power systems and the accumulated experience working with Cuban Electric System, the need of study the problems related with voltage stability of Cuban Electric System has arisen. In this paper, we make a first review about some static and dynamic mathematical methods included in bibliography about voltage stability of electric power systems.

Key words: Stability, transient stability, voltage stability, mathematical methods

INTRODUCCION

Desde hace más de dos décadas la inestabilidad de voltaje tiene gran importancia en la explotación de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP). La estabilidad del voltaje está relacionada con la habilidad del sistema para mantener los voltajes aceptables en todas las barras en condiciones normales de operación y

después de la ocurrencia de alguna contingencia. [1]. Un sistema puede entrar en un estado de inestabilidad del voltaje cuando ocurre un disturbio que bien puede ser el incremento en la demanda de la carga, o cambios en las condiciones del sistema que causan una progresiva e incontrolable disminución del voltaje

El corazón del problema es usualmente la caída de voltaje que ocurre cuando fluye una potencia reactiva y activa a través de una reactancia inductiva asociada con la red de transmisión. El principal factor que causa la inestabilidad es la incapacidad del sistema de potencia de satisfacer la demanda de potencia reactiva.

En la literatura técnica se encuentran detallados numerosos incidentes como son:

1. Sistema de New York Septiembre de 1970
2. Sistema de Florida diciembre de 1983.
3. Sistema Francés diciembre de 1978 y enero de 1987.
4. Sistema de Bélgica agosto de 1982.
5. Sistema Japonés julio de 1987.
6. Sistema de Chile en mayo de 1997

La inestabilidad de tensión es un fenómeno fundamentalmente dinámico por lo que es muy importante el modelado de los distintos componentes del SEP: generadores, cargas líneas, transformadores, equipos compensadores de reactivo, etc. Desde el punto de vista físico las causas fundamentales de que el sistema eléctrico experimente un colapso de tensión son varias [2-4].

Grandes transferencias por las líneas de transmisión: Las altas corrientes que circulan por las líneas de transmisión cuando se transfieren por estas grandes cantidades de potencia provocan caídas excesivas del voltaje que pueden llevar al colapso. Por otro lado las líneas largas de transmisión con baja carga se comportan como capacitores entregando reactivo y provocando sobretensiones en los nodos del sistema.

Generadores que alcanzan sus límites de reactivo: Cuando los generadores alcanzan sus límites de reactivo el voltaje terminal disminuye por lo que es necesaria la circulación de una mayor corriente para la entrega de la misma potencia. Este aumento en la corriente provoca un aumento de las caídas de voltaje. Además de esto disminuye la reserva de reactivo del sistema al alcanzar los generadores los límites de entrega.

Contingencias: La salida de elementos del sistema como generadores, líneas o transformadores puede desencadenar en un problema de inestabilidades. La pérdida de cualquiera de estos elementos provoca una redistribución de los flujos de potencia con el correspondiente aumento de las pérdidas y las caídas de voltaje. En el caso de la pérdida de

grupos generadores, si la potencia que estos entregaban se asume por otros de áreas lejanas aumentan las transferencias por las líneas. Si el grupo que sale de servicio entregaba un volumen alto de reactivo se deterioran los niveles de voltaje y la reserva de reactivo en el sistema.

Sin embargo, desde el punto de vista matemático el punto de colapso de voltaje depende de la distancia de un punto de operación a un punto límite o punto de colapso como es conocido en la literatura. Este punto se caracteriza por una bifurcación de silla-nodo de las ecuaciones del flujo, que matemáticamente no es más que la obtención de una jacobiana singular y es por eso que métodos clásicos como el Gauss-Seidel y el Neutow-Rapson presentan dificultades para alcanzar la convergencia.

COLAPSO DE TENSIÓN Y TEORÍA DE LAS BIFURCACIONES

De los diferentes tipos de bifurcaciones, la de nodo-silla es la que más interesa para los estudios de sistemas eléctricos ya que ellas describen unas de las causas primarias de las inestabilidades de voltaje [4]. Estas inestabilidades se deben fundamentalmente a problemas de déficit de reactivo en zonas locales del sistema.

Para entender el fenómeno del colapso de voltaje y estudiar su relación con la teoría de las bifurcaciones es necesario contar con un modelo adecuado del sistema eléctrico.

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, y, \lambda) \\ 0 = g(x, y, \lambda) \end{cases} \quad (1)$$

Donde el vector $x \in \mathbb{R}^n$ representa las variables de los estados asociados a los ángulos de los generadores y sus respectivas velocidades, $y \in \mathbb{R}^m$ representa las tensiones y ángulos en las barras de carga y $\lambda \in \mathbb{R}^p$ es un vector de parámetros reales que modela la variación lenta de la carga[2].

La función f representa la dinámica de los generadores y sus relaciones con la carga. La función g representa la interconexión de la red eléctrica y el balance de potencia en los nodos de carga.

En general se acepta y así se aprecia en la literatura especializada en el tema [2-7] que la bifurcación silla-nodo es una manera adecuada de modelar el fenómeno del colapso de tensiones.

$$z = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad F(z, \lambda) = \begin{bmatrix} f(x, y, \lambda) \\ g(x, y, \lambda) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Las condiciones que debe satisfacer el punto de bifurcación silla-nodo son las siguientes:

$$0 = F(z^*, \lambda^*) \quad (3)$$

$$0 = w^T D_x F(z^*, \lambda^*) \quad (4)$$

$$0 \neq w^T D_\lambda F(z^*, \lambda^*) \quad (5)$$

$$0 \neq w^T \left[D_{xx} F(z^*, \lambda^*) \right]_V \quad (6)$$

Las ecuaciones (3) y (4) indican que el punto de bifurcación es un punto de equilibrio del sistema, con Jacobiano singular con valor propio 0 simple y vectores propios izquierdo y derecho w y v respectivamente. Las condiciones (5) y (6) se denominan de transversalidad y están asociadas a la genericidad de esta clase de bifurcaciones.

Existen además asociado al fenómeno de las inestabilidades de tensiones otro tipo de bifurcaciones, la Hopf, que a diferencia de la de nodo-silla, que se caracteriza por un decaimiento monótono de los valores de voltaje, esta da lugar a un comportamiento oscilatorio creciente en el sistema.

INDICES DE LA ESTABILIDAD DE VOLTAJE

La utilización de índices para predecir la proximidad al colapso de tensión ha sido un tema de permanente interés para investigadores y equipos técnicos en el estudio del funcionamiento de sistemas eléctricos, ya que estos índices podrían ser usados para ayudar a los operadores a determinar la cercanía del sistema al colapso. Estos índices deberían tener una forma predictiva y continua, para que pudieran hacerse con ella predicciones aceptables, y deberían consumir poco tiempo de cálculo, particularmente para la visualización del sistema on-line.

Para un punto de funcionamiento en particular, la cantidad de carga adicional que causaría un colapso de tensión se denomina margen de carga al colapso de tensión. El margen de carga es el índice básico más ampliamente aceptado para el colapso de tensión y presenta las siguientes ventajas:

1. Este margen no se basa en un modelo en particular del sistema y puede ser usado para un modelo estático o dinámico independientemente de la dinámica del sistema eléctrico.

2. Es un índice exacto y tiene en cuenta las no linealidades del sistema y los límites de los dispositivos con el incremento de la carga.
3. La sensibilidad puede ser aplicada rápida y fácilmente para determinar como se afectan los parámetros del sistema y sus controles.
4. El margen tiene en cuenta una dirección de incremento de carga.

TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DEL VOLTAJE

Los estudios de las inestabilidades de tensión son de gran importancia para la planificación y operación de los SEP. Algunas metodologías analíticas han sido propuestas y aceptadas para la realización de estudios sobre estos problemas: técnicas estáticas para el estudio de la estabilidad de voltaje como son las curvas P-V y Q-V, método del valor singular mínimo, flujo de carga continuado, métodos del punto de colapso, métodos de optimización, análisis modal y técnicas de análisis dinámicas como análisis de las bifurcaciones Hopf y simulación en el dominio del tiempo.

TÉCNICAS ESTÁTICAS

El análisis estático de las inestabilidades de tensión se centra fundamentalmente en dos aspectos:

- Determinar cuan lejos se encuentra operando el sistema del punto donde se alcanza el colapso de voltaje. Para esto se utilizan los métodos de continuación, los métodos del punto de colapso o los de optimización para un aumento de carga dada y con el correspondiente redespacho de generación.
- Identificar los nodos o áreas propensas a la ocurrencia del fenómeno del colapso de voltaje usando el análisis modal.

MÉTODOS DEL PUNTO DE COLAPSO

El Punto de Colapso está dado por la nariz de la curva P-V o Q-V, donde los voltajes caen rápidamente con el incremento de la carga, es conocido además como un punto de equilibrio donde la matriz jacobiana del sistema se convierte en singular, las soluciones de los flujos de carga clásicos divergen al alcanzar los límites. Esto indica un problema de inestabilidad de voltaje asociado con un punto donde existe una bifurcación de nodo silla.

MÉTODOS DIRECTOS

Los métodos directos, también conocidos como métodos de punto de colapso [4] y [8], fueron originalmente desarrollados para calcular puntos de bifurcación singular en sistemas no lineales [9].

El método se basa en resolver el sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} F(z, \lambda) &= 0 \\ D_z F(z, \lambda)^T w &= 0 \\ \|w\|_\infty &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

para obtener directamente el punto de colapso (z^*, λ^*) [9].

El sistema de ecuaciones no singulares (7) corresponde al sistema en estado estacionario, las condiciones de singularidad en el punto de colapso, y el requisito del autovector izquierdo no nulo, para cualquier modelo de sistema, que es una ventaja de este método ya que no está basado en un modelo en particular. Otras ecuaciones con el requisito del autovector izquierdo y/o no nulo pueden usarse; sin embargo el sistema de ecuaciones (7) presenta las mejores características numéricas para grandes sistemas.

Este método permite determinar directamente el margen de carga al colapso $\Delta\lambda = \lambda^* - \lambda$ en cualquier punto de funcionamiento definido por λ . Generalmente el margen de carga tiene un comportamiento lineal y continuo, que permite predicciones exactas de la proximidad al colapso. El perfil lineal es independiente de los límites o tamaño del sistema, ya que para unas condiciones de funcionamiento y dirección de carga dadas, el valor de λ^* puede calcularse directamente a partir de (7) con todas las variables de control y límites relativos considerados. Cualquier contingencia de importancia, tal como la falta de un generador o la pérdida de una línea, se muestra como una reducción en la disponibilidad del sistema, que tiene un claro significado en el entorno del punto de funcionamiento. Nótese, sin embargo, que el efecto de los dispositivos que alcanzan sus límites cuando el sistema se aproxima al colapso no se refleja directamente como cambios en el índice.

Una desventaja obvia de esta técnica es el alto coste de cálculo, ya que el número de ecuaciones necesarias sobrepasa al número de ecuaciones que hay en estado estacionario. Además se precisan buenas condiciones iniciales, particularmente para w . Esto último, crea

problemas de convergencia cuando el sistema está lejos del punto de colapso, ya que los autovalores y autovectores cambian significativamente cuando el sistema se aproxima al colapso, lo que es además especialmente cierto cuando los límites de los dispositivos se alcanzan a lo largo del recorrido de la solución.

Otra desventaja del método directo es que solamente puede determinar un colapso de tensión asociado con singularidades del sistema (bifurcaciones). Los colapsos de tensión asociados con los límites del sistema, particularmente los generadores que alcanzan los límites de potencia reactiva [6], [9-10], no pueden ser detectados usando esta técnica, dando respuestas equivocadas en este caso.

MÉTODOS DE CONTINUACIÓN. PERFILES DE TENSIÓN

Los perfiles de tensión, también conocidos como curvas QV, PV o curvas de la "nariz", están hoy en uso en algunas compañías eléctricas para la determinación de la proximidad al colapso, de tal forma que los operadores pueden tomar medidas preventivas para evitar la pérdida del sistema [9]. Los cambios de tensión no son una buena forma de detectar la proximidad al colapso o detectar el efecto de los límites o contingencias sobre la cargabilidad del sistema [10], particularmente en barras bien compensadas o barras que no pertenecen al área crítica. Así pues, esta técnica es usada como una alternativa al método directo, así como para obtener información adicional sobre el comportamiento de la tensión en las barras del sistema.

MÉTODO DE LAS CURVAS P-V

En una red de potencia se pueden simular aumentos de carga de distintas maneras, de acuerdo a como se elija las barras en que se desea aumentar la carga activa y/o reactiva, y las proporciones relativas de los aumentos entre las cargas elegidas. Cuando se elige una de estas formas de aumentar la carga se dice que se ha seleccionado una dirección de carga en el sistema. Esto significa que se selecciona para cada barra j los valores de incrementos básicos de potencia activa ΔP_j y reactiva ΔQ_j , de forma que las cargas en esa barra se incrementen desde un estado inicial ΔP_{0j} y ΔQ_{0j} , a medida que aumenta el parámetro escalar de carga λ , de acuerdo con una

ley de la forma $P_j = P_{0j} + \lambda \Delta P_j$, $Q_j = Q_{0j} + \lambda \Delta Q_j$.

La gráfica de la variación de las tensiones $V(\lambda)$ [figura 1] en cada barra suele ser la clásica curva de la nariz o curva P-V.

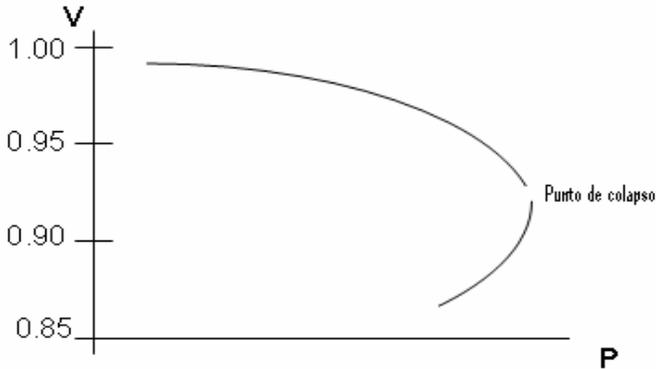


Fig. 1. Curvas P-V.

MÉTODO DE LAS CURVAS Q-V

El método de las curvas Q-V se basa en interpretar el colapso de tensión como un indicador de que existe un inadecuado balance de potencia reactiva en uno o más nodos del sistema. Consiste en ir aumentando el consumo de reactivo en cada una de las barras de la red (o al menos aquellas consideradas más débiles) hasta llegar al colapso.

Las curvas Q (V) obtenidas de esta forma para cada barra tiene la clásica formas "U", en que el mínimo de la curva, máximo valor de la carga Q representa el punto de colapso y proporciona un margen de reactivo al colapso en esa barra. El mínimo absoluto de ese margen en todas las barras del sistema será el margen al colapso de voltaje. Es útil observar que el método de las curvas Q-V no es más que un caso particular del método de las curvas P-V tratado en el tópico anterior. Visto de esta forma, se puede afirmar que este método será eficiente para planificar la red frente al colapso siempre y cuando en el sistema:

- Se puedan no tener en cuenta las variaciones de carga activa. Esto revelaría un alto grado de desacople entre las variables Q-V y P- δ .
- Sea posible obtener una buena aproximación al colapso variando la carga en una sola barra, esto revelaría que hay una barra mucho más débiles que las otras.

FLUJOS DE CONTINUACIÓN

Los métodos de continuación fueron originalmente desarrollados para la solución de sistemas de

ecuaciones diferenciales y han sido aplicados sucesivamente para determinar el punto de colapso en sistemas [10-13].

Se desarrollaron para resolver situaciones mal condicionadas en las cercanías del punto crítico, donde la jacobiana se convierte en singular y tienden a divergir los métodos basados en la técnica de Newton-Rapson.

Estos métodos resuelven ciertas dificultades que presentan los métodos que se basan en la solución de flujos de cargas sucesivos, puesto que no están basados en un modelo del sistema en particular, y permiten trazar el perfil de tensión completo cambiando automáticamente el valor de λ , sin tener que preocuparse de las singularidades de las ecuaciones del sistema [14].

La estrategia usada en estos métodos se ilustra en la figura 2, donde un punto de equilibrio conocido (z_1, λ_1) es usado para calcular el vector de dirección Δz_1 y un cambio $\Delta \lambda_1$ del parámetro del sistema.

Este primer paso es conocido como predictor, ya que genera un valor inicial $(z_1 + \Delta z_1, \lambda_1 + \Delta \lambda_1)$, que es usado en el paso corrector para calcular un nuevo punto de equilibrio (z_2, λ_2) en el perfil del sistema o diagrama de bifurcación. Ya que el Jacobiano $DzF|_*$ es singular en el punto de colapso (bifurcación), dependiendo de las técnicas usadas, algunas veces es necesaria realizar una parametrización en los pasos predictor y/o corrector para garantizar una solución numérica aceptable de las ecuaciones.

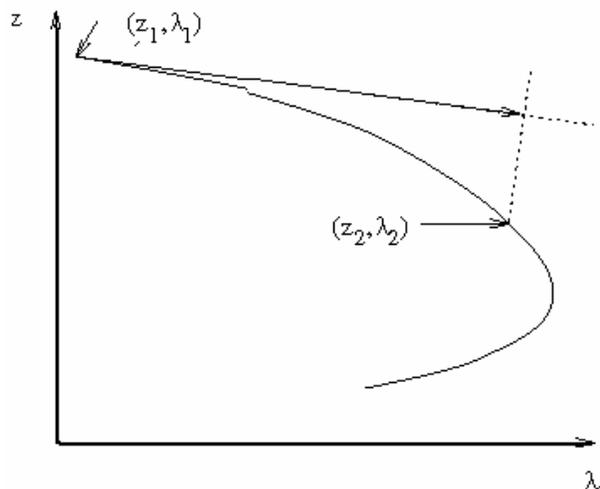


Fig. 2. Secuencia del Flujo continuado.

FLUJO DE CARGA ÓPTIMO

Muchos de los métodos numéricos usados en los estudios de colapso de voltaje como los métodos de continuación están basados en conceptos y/o técnicas asociadas al análisis de las bifurcaciones en los sistemas eléctricos. Más recientemente, sin embargo, han sido desarrolladas herramientas basadas en técnicas de optimización para el análisis de los problemas de inestabilidades de tensión. Se demuestra en [15] que la teoría de la bifurcación, es básicamente equivalente a algunas metodologías típicas de optimización. La determinación del punto de colapso puede ser formulado como un problema de optimización conocido en la bibliografía como Capacidad Total de Transferencia (**TTC**) por sus siglas en inglés.

Sistemas de ecuaciones similares a (7) se pueden obtener planteando el problema como un problema de optimización. De esta forma, el problema de colapso puede escribirse como:

$$\text{Min. } \lambda \quad (8)$$

$$F(z, \lambda) = 0$$

Este problema puede resolverse usando la Lagrangiana

$$L(z, \lambda, w) = \lambda + w^T F(z, \lambda) \quad (9)$$

donde w corresponde a los multiplicadores de Lagrange. Por lo tanto, las condiciones necesarias para obtener una solución de (8) son:

$$D_w L = F(z, \lambda) = 0$$

$$D_z L = D_z F(z, \lambda)^T w = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = w^T \frac{\partial F}{\partial \lambda}(z, \lambda) + 1 = 0$$

Estas ecuaciones son básicamente las mismas que en (7), con la excepción de la tercera, que es otra manera de garantizar un valor no nulo de w , que también corresponde a una de las condiciones de transversalidad de una bifurcación silla-nodo [8].

El planteamiento del problema de colapso como un problema de optimización permite el uso de técnicas bien conocidas para calcular el punto de bifurcación. Una técnica particular a la que se recurre, debido a su capacidad en el tratamiento de los límites, es el método de Punto Interior, que ha sido satisfactoriamente aplicado al cálculo del punto de colapso [16-17].

Otra de las aplicaciones de las técnicas de optimización en los estudios de estabilidad y

control de voltaje es la que permite determinar la ubicación y tipo de equipos compensadores de reactivo, como parte de la determinación óptima de la reserva de reactivo necesaria para la segura operación del sistema. El problema puede ser escrito de la siguiente forma:

$$\text{Min } \sum_{i \in N_c} [C_{0i} + C_{Li} \times Q_{Ci}]^k r_i$$

Sujeta a:

$$P_{Gi} + P_{Li} - P(V, \theta) = 0 \quad (\text{balance de potencia activa})$$

$$Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Li} - Q(V, \theta) = 0 \quad (\text{balance de potencia reactiva})$$

$$|LF_K| \leq LF_K^{\max} \quad (\text{Límite de flujo por las líneas})$$

$$V_i^{\min} \leq V_i^x \leq V_i^{\max} \quad (\text{Límite de voltaje en los nodos})$$

$$P_{Gii}^{\min} \leq P_{Gi}^x \leq P_{Gi}^{\max} \quad (\text{Límite de potencia activa})$$

$$Q_{Gii}^{\min} \leq Q_{Gi}^x \leq Q_{Gi}^{\max} \quad (\text{Límite de potencia reactiva})$$

$$Q_{Cii}^{\min} \leq Q_{Ci}^x \leq Q_{Ci}^{\max} \quad (\text{Límite de reactivo de las fuentes compensadoras})$$

Donde:

C_{0i} — Costo de instalación de las fuentes de reactivo

C_{Li} — Costo unitario de la fuente de reactivo

Q_{Ci} — Reactivo instalado en el nodo i

N_c — Conjunto de los posibles nodos de instalación de fuentes de reactivo.

r_i — 1 si la fuente está instalada en el nodo i , sino se le asigna el valor 0

P_{gi} — Potencia activa del generador

Q_{gi} — Potencia reactiva del generador

P_{Li} — Potencia activa de la carga

Q_{Li} — Potencia Reactiva de la carga

LF_K — Flujo por las líneas

V_i — Voltaje en los nodos.

ANÁLISIS MODAL

El análisis modal o análisis de autovalores de la matriz jacobiana del flujo de carga en las cercanías del punto de colapso, el cual es obtenido por algunas de las técnicas anteriormente discutidas.

Esta técnica de análisis modal puede ser utilizada para identificar los nodos más vulnerables a la

ocurrencia del colapso y donde es más beneficioso para el sistema la ubicación de dispositivos de inyección de potencia reactiva.

La participación de cada carga en las condiciones críticas determina la importancia de cada una de estas en el colapso. El grado de participación es determinado inspeccionando el autovector izquierdo en el modo crítico. Los componentes del autovector izquierdo pueden ser interpretados como una señal de la dirección normal hacia el límite operacional del sistema.

Los componentes del autovector derecho indican el grado con que algunas variables participan en un modo dado. El uso de ambos autovectores brinda una noción de los factores de participación. Estos factores indican cuales generadores tienen que generar más activo o reactivo o donde la descarga de consumidores puede ser más efectiva para aumentar al margen de estabilidad.

TÉCNICAS DINÁMICAS

1. Punto de bifurcación Hopf

No todos los eventos relacionados con el colapso de tensiones pueden ser asociados a pérdidas del punto de equilibrio, en otras palabras, bifurcación nodo silla, otras bifurcaciones pueden también aparecer en estos problemas como la bifurcación Hopf. En una bifurcación de Hopf, una situación de equilibrio estable llega a ser oscilatoriamente inestable y la consecuencia es una oscilación en el módulo de la tensión en estado estacionario o un transitorio oscilatorio y creciente por lo que corresponde a un problema dinámico de estabilidad de voltaje [18]. Esta bifurcación ocurre cuando el par complejo del autovalor de la jacobiana está exactamente en el eje imaginario cuando los parámetros varían lentamente.

2. Simulación en el dominio del tiempo

Los programas convencionales de estabilidad transitoria han sido en los últimos años ampliamente desarrollados para hacerlos apropiados para el análisis de los problemas dinámicos de larga duración y para los problemas de estabilidad del voltaje. Sin embargo estas simulaciones en el dominio del tiempo por lo general se combinan con las técnicas estáticas para los análisis de la estabilidad de voltaje.

CONCLUSIONES

El fenómeno de la inestabilidad depende fundamentalmente de las demandas de reactivo del sistema y muchas de sus causas dependen de la operación crítica de elementos que afectan la producción de potencia reactiva.

Este fenómeno se asocia fundamentalmente a dos tipos de bifurcaciones, la de nodo silla y la hopf.

La estabilidad de voltaje es un fenómeno dinámico y puede ser estudiado por un grupo de ecuaciones algebraicas y diferenciales. Sin embargo las técnicas estáticas mostradas en este artículo tienen un número de ventajas prácticas sobre las técnicas dinámicas que las hacen más atractivas.

- Se requieren solamente pequeñas modificaciones a los programas de flujos de carga.
- Las curvas P-V cubren un amplio rango de condiciones de operación del sistema.
- Las técnicas estáticas proveen mayor información sobre los parámetros de control del sistema y las inestabilidades de tensión.
- El margen de carga ha sido ampliamente aceptado como margen a la estabilidad de voltaje cuando cambian los parámetros del sistema.
- El análisis modal puede definir claramente las áreas propensas al colapso de tensión y permite identificar el lugar y el tipo de medidas más efectivas para alejar el sistema del punto de colapso.
- El margen estático de estabilidad de voltaje, no garantiza la no ocurrencia de fenómenos dinámicos de voltaje.

Las particularidades del análisis transitorio son:

- La simulación en dominio del tiempo permite trazar perfiles de voltaje en cada uno de los nodos del sistema, pero no permite determinar cuán cerca se está operando del punto de colapso.
- La simulación en dominio del tiempo se realiza para un punto de operación. Además requiere de un amplio número de casos de estudios y de contingencias.
- Muestran claramente el proceso transitorio de un punto de operación a otro, esto no puede hacerse con el método de las curvas P-V.

- Para la ubicación de equipos de compensación de reactivo y determinar la rapidez de operación del dispositivo es muy útil la simulación en dominio del tiempo.

REFERENCIAS

- [1] CALVAER, A. *Voltaje stability and voltaje collapse*. CIGRE report, paper 38.021985.
- [2] P. KUNDUR: "Power System Stability and Control", Mc Graw Hill, Inc. 1993.
- [3] VOURNAS:, T. V. C. A. C. "Voltage Stability of Electric Power Systems". *Power Electronics and Power Systems Series*, Kluwer Publishers. 1998.
- [4] CAÑIZARES, C. "Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools". *IEEE/PES*. 2001,
- [5] DOBSON, I. "Observations on the geometry of saddle node bifurcation and voltage collapse in electric power systems". *IEEE Trans. on Circuits and Systems*. Mar. 1992, vol. part 1, vol. 39, no. 3, pp. 240-243..
- [6] AJJARAPU, V. A. B. L. "The Application of Bifurcation Theory to Study The Nonlinear Dynamical Phenomena in An Electrical Power System". *IEEE Trans. on Power Systems*. Feb. 1992, vol.7, pp.424-432
- [7] CAÑIZARES, C. A. "Conditions for saddle-node bifurcations in AC/DC power systems". *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 1995, pp.61--68
- [8] A.LVARADO F. L. AN. T. H. JUNG. *Direct detection of voltage collapse conditions*. Editado por: In Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena| Voltage Stability and Security, E.-. Epri,. January 1989. pp. 5.23-5.38.
- [9]CANIZARES C. A. AN. F L. ALVARADO. "Point of collapse and continuation methods for large ac/dc systems". *IEEE Trans. Power Systems*. 1993, vol. 8, no. 1, February, pp. 1-8.
- [10] RAMOS, R. Y. O. "Multi-objetive reactive power compensation with voltaje security ".*IEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin América, Brazil*. Nov 2004, pp. 302-307
- [11] SUZUKI, M. E. A. "Newly developed voltage security monitoring system". *IEEE Trans. Power Systems*. August 1992 vol. 7, no. 3, pp. 965-973.
- [12] AJJARAPU, V. E. A. "An optimal reactive power planning strategy against voltage collapse". *IEEE transactions on Power Systems*. May 1994, vol. vol 9, no. 2, , n°. p. pp, 906-917.
- [13] SONG, H. "Reactive reserve-based contingency constrained optimal power flow (RCCOPF) for enhancement of voltage stability margin". *IEEE transactions on Power Systems*. nov 2003, vol 18, no. 4,pp. 1538-1546
- [14] CAÑIZARES, C. *Calculating optimal systems parameters to maximize the distance to saddle-*

node bifurcations. vols. Fundamental theory and Applications. IEEE Trans. On Circuits and Systems ed. Mar 1998. Vol 45, no.3, pp. 225-237.

[15]. CAÑIZARES, C. "Aplications of optimization to voltaje collapse analysis,Panel Session: Optimization techiques in Voltage Collapse Analysis". *IEEE/PES Summer Meeting, San Diego, California*,. July, 1998.

[16] G. D. IRISARRI, ET. All. "Maximum loadability of power systems using optimization method". *IEEE PES Winter Power Meeting, 96 WM 207-1-PWRS*.

[17] PARKER, C. J. ET. ALL.. "Application of an optimization method for determining the reactive margin from voltage collapse in reactive power planning". *IEEE PES Summer Power Meeting, Paper 95 SM 586-8 PWRS*.

[18] CAÑIZARES, C. Y. S. H. *Transcritical and hopf bifurcations in ac/dc systems,*" *Proc. Bulk Power Systems Phenomena III. Voltage Stability and Security*, Fairfax, VA, Aug. 1994.pp. 105-114.

AUTORES

Zaid García Sánchez

Ingeniero Electricista, Máster en Ciencias, Profesor Asistente, Centro de Estudios Electroenergéticos (CEE), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

e-mail: zaid@uclv.edu.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 (ISPJAE), Ciudad de La Habana, Cuba.

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

Susana Leyva Condeff

Ingeniera Electricista, trabaja en el Despacho Nacional de Carga Unión Eléctrica. Su labor consiste en analizar y optimizar la operación del Sistema Electroenergético Nacional.

e-mail: susanal@dnc.minbas.cu