

Utilización de las curvas PV y QV como herramienta de análisis de planificación.

Ing. Claudio Saldivar
Facultad Politécnica
Universidad Nacional del Este
Ciudad del Este-Paraguay
saldivar.claudio@gmail.com

Resumen

En el presente trabajo se aborda el problema de seguridad del voltaje en los sistemas de potencia. En este sentido, se analiza los márgenes de carga activo y reactivo de un determinado sistema con la curvas PV y QV respectivamente. Para la utilización de estas herramientas dentro de un determinado escenario de planificación, con algunas técnicas de estabilidad de tensión conocidas, se ha procedido a seleccionar las barras candidatas para la instalación de generadores y equipos de compensación de potencia reactiva. Para este propósito, a partir de un caso base, se calculan el margen de carga activo y reactivo del sistema. Además, con el margen de potencia reactiva de cada barra, la cual es obtenida con el uso de la curva de QV, es posible recabar informaciones relacionadas al soporte de reactivos, con lo cual se visualiza futuros problemas de inestabilidad de tensión. En particular, la aplicación de estas técnicas para el sistema paraguayo es muy interesante, debido a que este sistema contiene a su principal centro de cargas, sistema metropolitano, conectado de forma radial desde los centros de generación y con distancias bien significativas, con lo cual podrían surgir algunos problemas asociados a la estabilidad de la tensión.

Abstract

In this paper, the security issue is addressed in voltage power systems. In this sense, the margins of active and reactive load of a given system with PV and QV curves were analyzed respectively. For the use of these tools within a given scenario planning techniques with some voltage stability, we proceeded to select candidates buses for the installation some equipment such as generators and reactive compensation shunt. For this purpose, from a base case, the margin of active and reactive load of the system is calculated. Moreover, reactive power margin of each bus, which is obtained using QV curve, it is possible to obtain information related reagent carrier, whereby future voltage instability problems is displayed. In particular, the application of these techniques to the Paraguayan system is very interesting, because this system contains a main load, metropolitan system, connected radially from the generating centers with well significant distances, which could arise some problems associated with the voltage stability.

1. INTRODUCCIÓN

La planificación de la expansión de un sistema de potencia es una tarea compleja que involucra diferentes temas como la estabilidad transitoria, estabilidad de tensión, la fiabilidad y los esquemas de protección. Las herramientas computacionales desarrolladas pueden incluir aspectos estáticos y dinámicos del sistema, que abarca una amplia gama de posibles estudios. En cuanto a los estudios de estabilidad de tensión, en general, un punto de colapso de tensión se asocia con un Jacobiano singular. En este punto de singularidad, conocida como bifurcación silla-nodo, la matriz jacobiana flujo de potencia tiene un valor propio cero. No se puede obtener una solución más allá de este punto crítico, que es el punto de capacidad de carga máxima del sistema. También puede ocurrir bifurcación inducida, debido al agotamiento de las fuentes repentinas de potencia reactiva. El fenómeno Colapso de Tensión es local o, como mucho, un fenómeno regional. Por

lo tanto, identificar al sistema de barra crítica (o barras), esto es, la barra donde se origina el problema, es muy importante. Estas barras críticas constituyen el conjunto de barras candidatas para el refuerzo contra el colapso de tensión. Además, estas barras son las más probables, para la reducción de pérdidas cuando se considera la compensación de potencia reactiva, otro conjunto de barras de interés.

Otra forma de evaluar la seguridad de la tensión del sistema es por medio de la reducción de pérdidas. Esta idea proviene del hecho de que el colapso de tensión puede estar asociado con altos valores de pérdida. En este sentido, la reducción de las pérdidas puede mantener un sistema alejado de la caída de tensión. Como se ha discutido en la literatura, esto no es correcto, ya que la reducción de pérdidas y colapso de tensión pueden ser diferentes problemas. Sin embargo, la reducción de la pérdida en el área crítica del sistema puede producir buenos resultados, y la reducción de pérdidas se debe considerar en los estudios de seguridad de tensión.

Combinando los estudios de estabilidad de tensión y reducción de pérdidas nos proporcionan resultados interesantes que pueden evaluarse mediante el cálculo del margen de carga, por lo que la robustez del sistema es fundamental. Otra forma de analizar la robustez del sistema es mediante el uso de la curva QV [1]. Esta curva proporciona el margen de potencia reactiva de cada barra y se obtiene mediante la transformación de una barra PQ en una PV y variando su nivel de tensión. Para cada nivel de tensión considerado la potencia reactiva generada se almacena, generando una curva representativa de la robustez de las barras con respecto al soporte de potencia reactiva.

En este trabajo se propone una estrategia para el escenario de planificación basado en las herramientas teóricas descritas anteriormente. Por este motivo, se emplea el sistema paraguayo real, con todos sus límites tomados en consideración. Los resultados se obtienen en las posibilidades reales de operación y se discute la efectividad de las acciones propuestas.

2. TÉCNICAS DE MARGEN DE CARGA

En esta sección se describe cómo funciona el método de continuación, así como la importancia del vector tangente calculada durante el proceso. Tras la presentación del método de continuación, una discusión del área crítica tiene lugar.

Se describe el método de la continuación utilizado para el trazado de las Curvas PV, y la importancia del vector tangente calculado durante el proceso. Posteriormente, en las siguientes secciones, se realiza una discusión acerca de las pérdidas del sistema y la determinación del área crítica.

2.1 Método de la Continuación

El Método de la Continuación puede ser utilizado para trazar el camino andado por un sistema de potencia desde un punto de equilibrio estable hasta el punto de bifurcación [4], [5], obteniéndose finalmente el Margen de Carga del Sistema para la dirección de crecimiento de carga considerada. Esta metodología se basa en el siguiente modelo del sistema:

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (1)$$

en el que x representa las variables de estado, siendo λ un parámetro del sistema utilizado para llevar al sistema desde un punto de equilibrio a otro. Este tipo de modelo se ha empleado en numerosos estudios de colapso de tensión, siendo λ normalmente el factor de crecimiento carga / generación del sistema. Dos pasos mueven al sistema a lo largo del camino de la bifurcación: el paso predictor y el paso corrector.

2.2 Paso Predictor

El Paso Predictor es utilizado para definir una dirección de movimiento. El Vector Tangente puede ser utilizado para este propósito, y viene dado por:

$$VT = \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta\lambda} = \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} K_p P_0 \\ K_q Q_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde $[J]$ representa la matriz Jacobiana del flujo de carga linealizado, θ y V las variables de estado (ángulo de fase y magnitud de la tensión, respectivamente), y P_0 y Q_0 son las potencias netas activa y reactiva conectadas a cada barra. Es importante notar que λ está relacionada con la variación del parámetro del sistema, mientras que las constantes K_p y K_q indican una dirección particular de crecimiento de la carga asociada con cada barra. Si el crecimiento de las cargas es idéntico en todas las barras con factor de potencia constante en relación al caso base, entonces los valores de K asumen el valor unitario. La longitud del paso predictor está dada por:

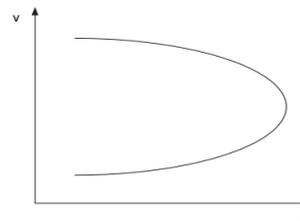
$$\Delta\lambda = \frac{1}{\|VT\|} \quad (3)$$

en el que $\| \cdot \|$ representa la norma de vector tangente. De esta expresión se deduce que, cuanto más pronunciada sea la curva, más pequeño es el paso predictor, y viceversa. El método avanza con grandes pasos mientras el sistema se encuentre lejos del punto de bifurcación, y con pasos menores en la medida que se acerca a dicho punto. El punto de operación del sistema es obtenido posteriormente con el paso corrector.

2.3 Paso Corrector

El Paso Corrector se obtiene mediante la inclusión de una ecuación adicional. Tal ecuación surge del hecho de que el paso predictor y el paso corrector son vectores perpendiculares entre sí. Una alternativa a este paso es la obtención del nuevo punto operativo mediante el paso predictor como la estimación inicial para un programa de flujo de carga. En general, con esta metodología, el sistema converge en muy pocas iteraciones.

Fig.1: Curva PV típica.



3. METODO DE LA CURVA QV

El método de la Curva QV [7], puede ser utilizado como una herramienta de planificación de sistemas de potencia, la cual podría ser complementada con otros estudios estáticos y dinámicos [8], [9]. El análisis de las curvas QV debe ser realizado en conjunto con las curvas PV, lo cual permite identificar las barras críticas del sistema así como los

requerimientos de potencia reactiva en las barras para garantizar la seguridad de tensión.

La posibilidad de reducir el costo computacional asociado con el cálculo de las curvas QV es abordada en esta sección. Al igual que para las curvas PV, no toda la curva resulta de interés. Más bien lo que se busca, es aquél punto de mínima inyección de potencia reactiva, proporcionando como resultado el margen de potencia reactiva para la barra analizada. Para este propósito, un método relativamente novedoso llamado método de la continuación QV, se emplea tal como se describe a continuación.

3.1 Método de la Continuación QV

La idea es trazar la curva QV mediante pasos controlados hasta llegar al punto mínimo de la Curva. El tamaño del paso está regulado por el vector tangente según:

$$\Delta\lambda = \frac{k}{\|VT_Q\|} \quad (6)$$

donde k es un valor escalar utilizado para acelerar o desacelerar el cómputo; $\| \cdot \|$ denota la norma de un vector tangente modificado VT_Q , el cual se calcula según:

$$VT_Q = [J]^{-1}Q_1 \quad (7)$$

En la ecuación (7), $[J]$ es el jacobiano del flujo de potencia; Q_1 es un vector con todos sus componentes iguales a cero, excepto por aquella asociada a la potencia reactiva de la barra en estudio. Es importante mencionar que los límites de potencia reactiva para todas las demás barras de tensión controlada (barras PV) son tenidos en cuenta. Con la longitud del paso calculada con la ecuación (6), las tensiones en las barras PQ se actualizan según:

$$\Delta V = k \frac{VT_Q}{\|VT_Q\|} \quad (8)$$

La actualización de las variables de estado a través de la ecuación (8) (paso corrector) mantiene al problema bien condicionado durante el proceso de convergencia del problema de flujo de potencia, durante el cual, la barra analizada es considerada como una barra del tipo PV. Sin embargo, el cálculo de la longitud del paso y la corrección del nivel de tensión se ejecutan considerando a esta barra como una del tipo PQ. Esto ocurre independientemente del tipo de barra original en estudio. El costo computacional para la obtención de VT_Q , y consecuentemente de la longitud del paso y del término de corrección, es sin embargo muy reducido, ya que su cómputo sólo se ejecuta luego de la convergencia del método de Newton-Raphson, por lo que no se requiere de un nuevo cálculo de la matriz jacobiana.

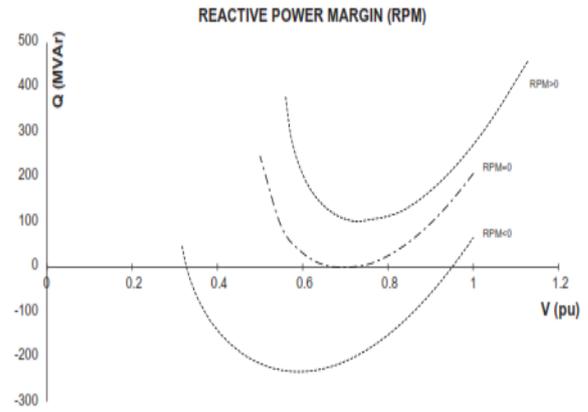


Fig.2: Curva QV típica.

4. METODOLOGÍA

Debido a que el sistema paraguayo presenta algunos puntos débiles con respecto a la estabilidad de tensión, la idea es evaluar cómo responde el sistema cuando se instala una unidad de pequeña generación. Se evalúan los efectos en el margen de carga del sistema (MC) y el margen de potencia reactiva (MCR). En este sentido, las siguientes opciones de barras se consideran para la instalación:

- Barras críticas identificados por el vector tangente,
- Los barras con el menor y el margen de potencia reactiva mayor, calculado por la curva QV,

Los resultados obtenidos se comparan, por lo que se obtiene una buena estrategia de planificación.

5. RESULTADO DEL TEST

5.1 Test Sistemas IEEE

Las metodologías propuestas fueron puestas a prueba mediante el uso de los sistemas de prueba IEEE. Debido a que los resultados cualitativos obtenidos son similares para todos los sistemas de prueba, se discute sólo el sistema de 30 barras. La idea es considerar pequeñas unidades generadoras y obras de transmisión en las barras indicadas por los siguientes índices:

- Vector Tangente, caso base (VT): La barra con la entrada más grande en el vector tangente calculada en el caso base.
- Margen reactiva de potencia (MCR): Barra con el margen de potencia reactiva por lo menos en el caso base.
- Vector tangente en el punto de colapso de tensión (VTC): La barra más crítica en el punto de colapso de voltaje indicado por el vector tangente.
- Mezcla las técnicas (Mix): Se obtiene un conjunto de barras mediante la mezcla de las técnicas anteriores. Esto produce una reducción de las barras a ser considerado. Se elige la barra que produce la menor MCR.

La Figura I muestra los resultados obtenidos:

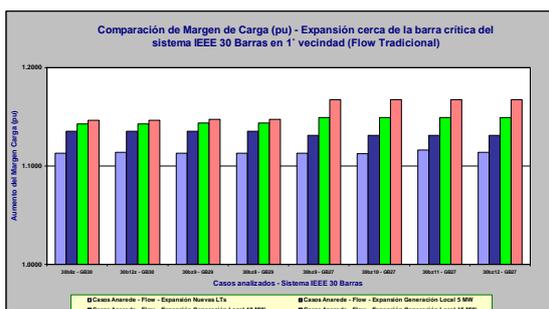


Fig. 1: Comparación de los resultados obtenidos para el IEEE 30 – Método Flujo Tradicional (Anarede).

En la figura I se observa los valores de MC obtenidos utilizando un de programa de flujo de potencia (Anarede), y en la Figura 2 utilizando el método de la continuación. Puede observarse también, que por el método de la continuación los MC obtenidos son superiores a los de método tradicional.



Fig. 2: Resultados obtenidos para el sistema IEEE 30 – Método de la continuación.

Esta particularidad es algo esperado debido a que con el método de la continuación el punto de bifurcación es alcanzado, mientras que con el método tradicional la misma no es atendida debido a problemas de convergencia que surgen cuando el aumento de la carga tiende hacia el punto de la bifurcación y es utilizado el método de Newton Raphson.

5.2 Resultados para el sistema de ANDE

En esta sección se presentan los resultados obtenidos cuando se emplea el Subsistema 1 (SS1) de Paraguay y específicamente dentro del mismo el Sistema Este. Las Subestaciones pertenecientes a este sistema así como sus respectivos niveles de tensión son indicados en la tabla I a continuación:

Tabla I: Subestaciones que componen el subsistema Este de la ANDE y sus respectivos niveles de tensión.

Subestaciones	Niveles de tensión (kV)
Margen Derecha	500 - 220 - 66
Acaray	220 - 66 - 23
Kilometro 30	220 - 66 - 23
Presidente Franco	220 - 66 - 23
Itakyry	220 - 66 - 23
Campo Dos	220 - 23
Alto Paraná	66 - 23
Hernandarias	66 - 23
Kilometro 15	66 - 23
Curuguay	66 - 23
Catueté	66 - 23
Minga Porá	66 - 23
Paranambú	220 - 66 - 23
Naranjal	66 - 23
Carlos Antonio López	220 - 23

A seguir en la tabla II se presenta el Listado de obras de expansión tomadas en consideración para comparación de los márgenes de carga obtenidos en los diferentes métodos utilizados.

Tabla II: Listado de Obras de Expansión del sistema Este de ANDE.

Caso	Obra realizada - Descripción	Sistema
Pybz1 - base	Sin obras de ampliación (caso base)	Este
Pybz2	Margen Derecha - Acaray (nueva LT 220 kV)	Este
Pybz3	Acaray - Presidente Franco (nueva LT 220 kV)	Este
Pybz4	TR 500/220 kV en SE Margen Derecha (Nuevo TR)	Este
Pybz5	Paranambú - Naranjal (nueva LT 66 kV)	Este
Pybz6	Transformador 66/23 kV en Naranjal (Nuevo TR)	Este
Pybz7	Transformador 220/66 kV en Paranambú (Nuevo TR)	Este
Pybz8	Generación de 5 MW en la barra de 23 kV de Naranjal	Este
Pybz9	Generación de 10 MW en la barra de 23 kV de Naranjal	Este
Pybz10	Generación de 15 MW en la barra de 23 kV de Naranjal	Este
Pybz11	Generación de 20 MW en la barra de 23 kV de Naranjal	Este
Pybz12	Margen Derecha - Itakyry (nueva LT 220 kV)	Este
Pybz13	Transformador 220/66 kV en Itakyry (Nuevo TR)	Este
Pybz14	Itakyry - Catueté (nueva LT 66 kV)	Este
Pybz15	Transformador 66/23 kV en Catueté (Nuevo TR)	Este
Pybz16	Generación de 5 MW en la barra de 23 kV de Catueté	Este
Pybz17	Generación de 10 MW en la barra de 23 kV de Catueté	Este
Pybz18	Generación de 15 MW en la barra de 23 kV de Catueté	Este
Pybz19	Generación de 20 MW en la barra de 23 kV de Catueté	Este

Los valores de márgenes de potencia reactiva cerca de la zona de Naranjal son indicados a continuación:

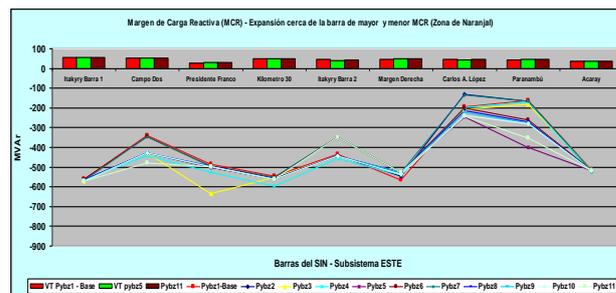


Fig. 3: Márgenes de carga reactiva – Zona Naranjal.

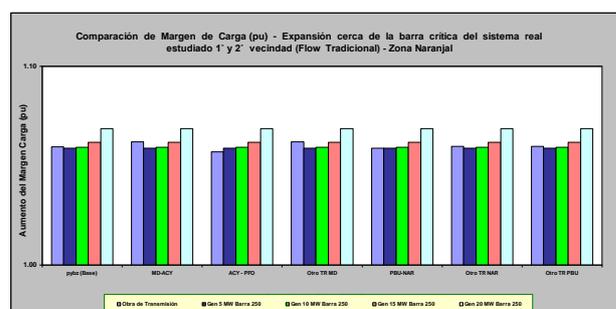


Fig. 4: Margen de Carga (MC) para expansiones cerca de la barra crítica en el sistema real estudiado con flujo de potencia Tradicional – Zona Naranjal.

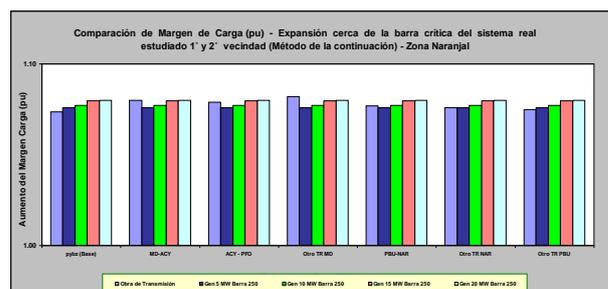


Fig. 5: Margen de Carga (MC) para expansiones cerca de la barra crítica - Método de la continuación – Zona Naranjal.

De igual manera los valores de márgenes de potencia reactiva cerca de la zona de Catueté son indicados a continuación:

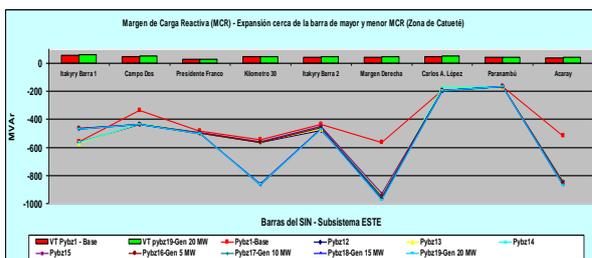


Fig. 6: Márgenes de carga reactiva – Catueté.

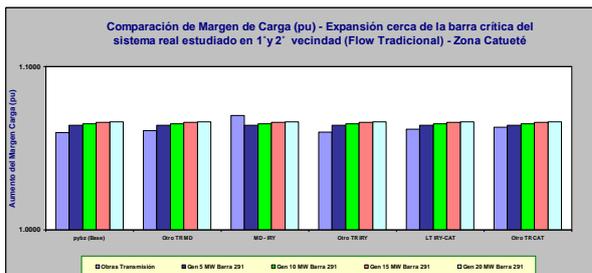


Fig. 7: Margen de Carga (MC) para expansiones cerca de la barra crítica en el sistema real estudiado con flujo de potencia Tradicional – Zona Catueté.

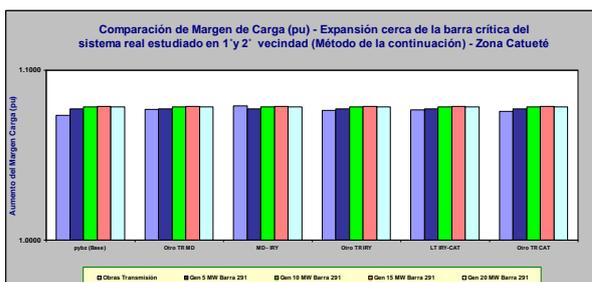


Fig. 8: Margen de Carga (MC) para expansiones cerca de la barra crítica - Método de la continuación – Zona Catueté.

6. CONCLUSION

En este trabajo se propone una herramienta de planificación en base a unos criterios de estabilidad de tensión. A tal efecto, una combinación del margen de potencia reactiva y aumento del margen de carga se centran. Pequeñas unidades de generación se consideran como acciones de control en algunos grupos de barras, como así también la inserción de obras de transmisión. En primer lugar, los sistemas de IEEE académicas han sido probados y los resultados alentadores estimulado para emplear la técnica propuesta en el sistema de Paraguay. Este sistema ha sido elegido debido a su fragilidad en seguridad de tensión, por lo que los resultados podrían ser mejor evaluados. Una vez más, se han obtenido buenos resultados y algunas características no observadas en los sistemas académicos podrían ser exploradas en el sistema eléctrico de potencia de Paraguay ANDE. La metodología que aquí se propone puede ser utilizada para otros sistemas sin restricción, ya que los diferentes grupos de barras se identifican y se ensayaron como candidatos para acoger las

actuaciones de control propuestas. Comparación con los criterios utilizados en la actualidad muestra una metodología que resulto ser muy eficaz para el análisis.

7. REFERENCIAS

- [1] Fritz W. Mohn, A. C. Zambroni de Souza, Tracing PV and QV Curves with the Help of a CRIC Continuation Method. IEEE Transactions on Power Systems, v.21, p.1104 - 1114, 2006.
- [2] D. A. Alves, L. C. P. da Silva, C. A. Castro e V. F. da Costa., Continuation fast decoupled power flow with secant predictor, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 3, Aug. 2003, pp. 1078 - 1085.
- [3] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.
- [4] T. V. Cutsem, C. Vournas, *Voltage Stability of Electric Power Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [5] B. H. Chowdhury, C. W. Taylor, “**Voltage stability analysis: V-Q power flow simulation versus dynamic simulation**”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, No. 4, pp. 1354-1359, Nov. 2000.
- [6] Show-Kang Chang, Vladimir Brandwajn., “Adjusted solutions in fast decoupled load flow”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.3, N. 2, pp. 726-733, May 1988.
- [7] A . C. Zambroni de Souza, Fritz W. Mohn, Isabella F. Borges, Tito R. Ocariz, “Using PV and QV Curves with the Meaning of Static Contingency Screening and Planning”, accepted for publication by the Electric Power Systems Research.
- [8] V. Venkatasubramanian, “Singularity Induced Bifurcation and the van der Pol Oscillator”, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 41, No. 11, pp. 765-769, November 1994.
- [9] M. K. Pal, “Voltage Instability Considering Load Characteristics”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 243-249, February 1992.
- [10] R. A. Schlueter, “A Voltage Stability Security Assessment Method”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 4, pp. 1423-1438, November 1998.