Análisis Estático de Estabilidad de Voltaje Aplicado al Sistema Nacional Interconectado

Adriano Alcívar Araujo   Dalton Maridueña Franco   Christian Larrosa Almendares[1]
aalcívar@inproel.com   dmaridue@hotmail.com   clarrosa@fiec.espol.edu.ec
Dr. Cristóbal Mera Gencon[2].
cmera@fiec.espol.edu.ec
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador
[1]Egresados de Ingeniería en Electricidad especialización Potencia, ESPOL, 2004
[2]Ingeniero Eléctrico 1977, ESPOL; Master of Engineering in Electrical Engineering, Texas A&M University, Texas, USA 1980; Ph.D. in Electrical Engineering, Texas A&M University, Texas, USA 1996; Profesor de la FIEC desde 1980.

Resumen.

El objetivo de este trabajo es aplicar el análisis estático de estabilidad de voltaje al sistema nacional interconectado ecuatoriano (SNI), dado que este es un tema de estudio de mucha importancia en la operación de los sistemas de potencia. La problemática de la estabilidad de voltaje, involucra básicamente los incrementos de la carga, flujo de potencia reactiva y severos disturbios en el sistema. Cuando los incrementos de carga se presentan como una operación normal del sistema, los voltajes varían aumentando o disminuyendo en su magnitud, esto normalmente es controlado por los sistemas automáticos de control que poseen los diferentes equipos en un de sistema potencia. Sin embargo, si estos incrementos se presentaren de una manera descontrolada, es decir aumentos en la carga acompañados normalmente de severas contingencias, o la salida de importantes fuentes de potencia reactiva, esto podría llevar a un estado inestable en los voltajes del sistema. Este fenómeno es conocido en el campo de la ingeniería eléctrica como "colapso de voltaje".

Palabras claves: *Estabilidad de Voltaje, Potencia reactiva, Incrementos de la carga, Colapso de voltaje*

Abstract.

The objective of this work is to apply voltage static analysis to the Ecuadorian National Interconnected System (SNI). The voltage stability problem basically involves load increases, reactive power flow and severe disturbances in the system. When load increases appear as normal system operation, voltage magnitudes vary in increasing or decreasing, this is normally controlled by the automatic control systems which have the different devices in a power system. Nevertheless, if these increases appear of an uncontrolled way, that is, increases in the load followed normally of severe contingencies, or outage of important reactive power sources, this could take to an unstable state in system voltages. This phenomenon is known in the field of electrical engineering as "voltage collapse".

Keywords: *Voltage Stability, Load increases, Reactive power, Voltage collapse.*

1. Introducción.

El análisis de estabilidad de voltaje puede llevarse a cabo mediante dos métodos diferentes, los métodos estáticos y las simulaciones en el tiempo. Muchos aspectos de los problemas de estabilidad de voltaje se pueden analizar eficazmente haciendo uso de los métodos estáticos, los cuales evalúan la viabilidad del punto de equilibrio representado por una condición de operación específica del sistema de potencia. Las técnicas del análisis estático permiten analizar un amplio rango de condiciones del sistema, pueden dar un conocimiento profundo de la naturaleza del problema e identificar los factores claves de contribución al colpaso. El análisis de estabilidad de voltaje al SNI se lo realizará a través de Ec. 5.3métodos estáticos: Análisis Modal Q-V, Curvas V-Q y Curvas P-V. El análisis de estabilidad de voltaje estático está basado en el modelo de flujo de carga convencional.

Se define la inestabilidad de voltaje como el intento de la dinámica de la carga para restaurar el consumo de potencia además de la combinación de la capacidad del sistema de transmisión y generación [3].

El colapso de voltaje típicamente ocurre en sistemas de potencia que están altamente cargados, fallan y / o tienen deficiencia de potencia reactiva. Hay algunos cambios conocidos en los sistemas de potencia que contribuyen al colapso de voltaje: Incremento en la carga; generadores, condensadores síncronos, o SVC alcanzando límites de potencia reactiva; acción de los transformadores con cambiadores de tap bajo carga; recuperación dinámica de la carga; disparo de líneas o salida de generadores.

El colapso de voltaje puede también ser causado por un cambio en cascada del sistema de potencia, como por ejemplo una serie de disparos de líneas de transmisión con generadores que han alcanzado sus límites de potencia reactiva.

2. Aspectos fundamentales.

2.1. Sistema de barra infinita con carga única.

Se modela un pequeño circuito con un solo generador y carga única para empezar el análisis matemático de la estabilidad.

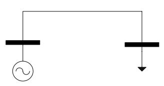


Figura 2.1 Sistema de simple carga, barra infinita

Para una mayor simplicidad, despreciaremos la resistencia de transmisión de nuestro sistema. También tomaremos la fuente ideal de voltaje como fasor de referencia tal que E = E$\angle$0. Nosotros denotamos la magnitud del voltaje de la carga y ángulo de fase por V y θ respectivamente. De la figura 2.1 se obtiene que:

$$P = -\frac{EV}{X}\sin\theta \qquad \text{Ec.2.1a}$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X}\cos\theta \qquad \text{Ec.2.1b}$$

Las ecuaciones anteriores son ecuaciones de flujo de carga o de flujo de potencia, de un sistema sin pérdidas. Para una carga dada (P, Q), ellas tienen que ser resueltas con respecto a V y θ, de allí todas las otras variables son calculadas. Eliminando θ de las ecuaciones 2.1 a y b, nos da:

$$(V^2)^2 + (2QX - E^2)V^2 + X^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad \text{Ec.2.2}$$

Esta ecuación resulta ser interesante porque de ella obtendremos las curvas PV y VQ. Esta es una ecuación de segundo orden con respecto a V^2. La condición para tener al menos una solución es:

$$-P^2 - \frac{E^2}{X}Q + \left(\frac{E^2}{2X}\right)^2 \geq 0 \qquad \text{Ec.2.3}$$

La ecuación 2.3 corresponde a una parábola en el plano (P, Q) como se muestra en la Fig. 2.2. Todos los puntos dentro de la parábola satisfacen Ec.2.3 y por lo tanto conducen a dos soluciones de flujo de potencia. Fuera de la curva no hay solución mientras sobre la línea de la curva hay una simple solución. Esta parábola es el lugar geométrico de todos los puntos de máxima potencia. Puntos con potencia negativa corresponden a una máxima generación mientras que cada punto con P positiva corresponde a la máxima carga bajo un factor de potencia dado.

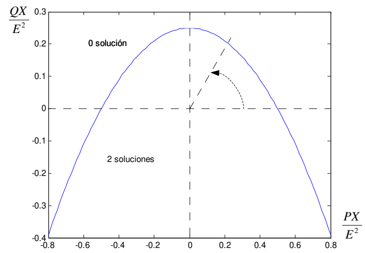


Figura 2.2 Dominio de existencia para la solución de flujo de potencia.

2.3. Curvas P-V

Son curvas que relacionan el nivel de cargabilidad del sistema con el nivel de voltaje de una barra dada, son muy utilizadas en el análisis estático de estabilidad de voltaje. Tomando la misma ecuación 2.2 podemos dividirla para E^4 para obtener:

$$v^4 + v^2(2q-1) + p^2 + q^2 = 0 \qquad \text{Ec.2.4}$$

Tomando E como base del sistema ahora consideramos que:

$$\frac{V}{E} = v \qquad \frac{PX}{E^2} = p \qquad \frac{QX}{E^2} = q$$

Donde esta define una superficie en el espacio y se puede observar el comportamiento de este sistema.

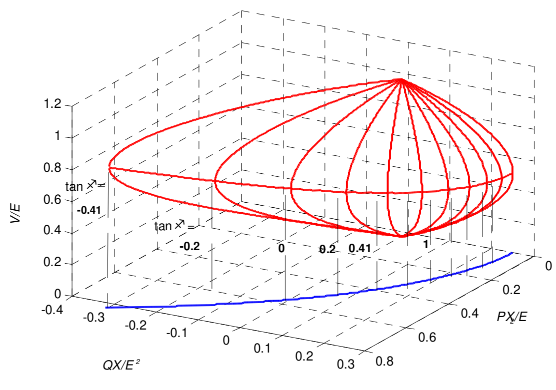


Figura 2.3. Voltaje como función de la potencia activa y reactiva de la carga

Los meridianos dibujados con líneas seguidas en Fig. 2.3 corresponden a las intersecciones con los planos verticales Q = P tan Φ, para Φ variando de acuerdo a la Fig. 2.4. Proyectando estos meridianos en el plano (P, V) se obtienen las curvas de voltaje de carga como una función de la potencia activa, para varios tan Φ. Estas curvas famosas, mostradas en la Fig. 2.4, son generalmente referidas como curvas PV o curvas nariz, ellas juegan un papel importante en el entendimiento y explicación de la inestabilidad de voltaje. Nosotros podríamos similarmente:

- Proyectar los meridianos en el plano (Q, V), por lo tanto se producen las curvas QV.
- Tomar la potencia aparente S $=\sqrt{P^2+Q^2}$ como la abcisa y considerar curvas SV.
- Considerar curvas VQ correspondiente a potencia activa constante P , o
- Curvas PV bajo potencia reactiva Q constante.

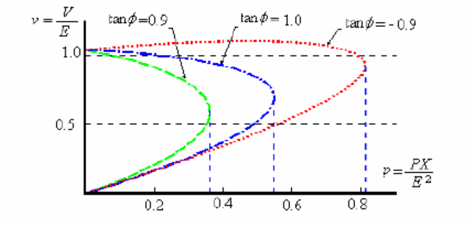


Fig.2.4 Curvas PV

2.4. Curvas V-Q

Una curva VQ expresa la relación entre la potencia reactiva suministrada Qc en una barra dada y el voltaje en esa barra. Podemos construir las curvas VQ partiendo de las curvas PV (Fig.2.4). Para valores constantes de P, anotamos los valores v y q (dos pares para cada factor de potencia), y entonces se grafica. En el gráfico 2.5 se muestra el resultado. Para sistemas grandes las curvas son obtenidas por una serie de simulaciones de flujo de potencia. Esto consiste en conectar un generador ficticio con una potencia activa nula y registrando la potencia reactiva Qc producida mientras se varía el voltaje V. En programas de computadoras, la barra es convertida a barra de control sin límites de potencia reactiva. Debido a que no produce alguna potencia activa, este generador ficticio es referido como un condensador sincrónico. Ya que el voltaje es tomado como variable independiente, es común usar V como abcisa y producir curvas VQ en lugar de curvas QV.

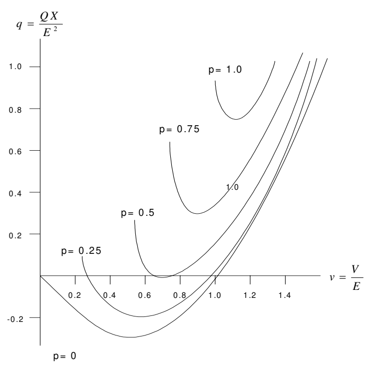


Figura 2.5. Curvas V-Q

3. Aspectos de la generación.

Los generadores sincrónicos son una fuente primaria de potencia reactiva y son en gran medida responsables de mantener un buen perfil de voltaje en todo el sistema de potencia. Consecuentemente sus características y sus limitaciones son de mucha importancia para el análisis de estabilidad de voltaje.

Estos generadores con sus controles son unos de los equipos más complejos en los sistemas de potencia.

Con la potencia real ajustada, la capacidad de suministrar potencia reactiva es limitada por el calentamiento del devanado de la armadura (estator) o del campo (rotor), los límites de calentamiento del devanado de la armadura o del campo pueden ser representados por el gráfico potencia real/potencia reactiva mostrado en la Fig. 3.1.

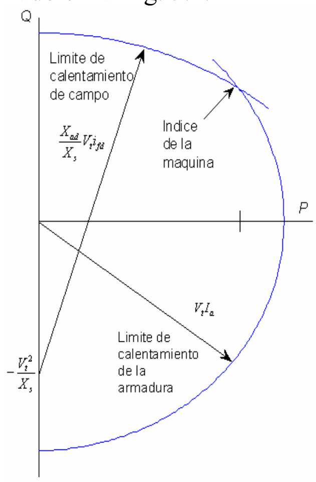


Fig. 3.1 Curva de capabilidad del generador [1]

Estas curvas son importantes porque:

- La potencia de carga máxima es reducida severamente cuando la corriente de campo del generador local alcanza su límite.
- Se observa cómo el límite de potencia reactiva del generador afecta el límite de potencia activa de la carga lo cual muestra una vez más que la inestabilidad de voltaje involucra un fuerte acoplamiento entre potencia activa y reactiva.

Un aspecto importante son los controladores de frecuencia (gobernadores) ya que luego de un incidente tales como salida de líneas o generadores los voltajes de la red usualmente caen, causando que la potencia de la carga sensible al voltaje también decrezca, el generador reacciona debido a los efectos del gobernador.

El control automático de voltaje (AVR) es uno de los dispositivos de mayor importancia en el control de voltaje en un sistema de potencia. Bajo condiciones normales el voltaje en los terminales es mantenido constante. Durante condiciones bajas del sistema, la demanda de potencia reactiva en los generadores podría exceder su límite de corriente de armadura o corriente de campo. Cuando la producción de potencia reactiva es limitada, el voltaje terminal no es mantenido constante por mucho tiempo.

4. Aspectos de la carga

La característica de la carga y el equipo del sistema de control de voltaje de distribución están entre los factores que tienen más influencia en la estabilidad de voltaje. La característica de la carga es una expresión que da la potencia activa o reactiva consumida por la carga como una función del voltaje, para esto las más usadas son: Característica de carga con modelo exponencial y la característica de carga con modelo polinomial.

Los motores de inducción son cargas especiales desde el punto de vista de la estabilidad debido a :

- Es una carga de restauración rápida en una franja de tiempo de un segundo
- Es una carga con bajo factor de potencia y alta demanda de potencia reactiva
- Es propensa al frenado, cuando el voltaje es bajo o la carga mecánica es incrementada.

Los cambiadores de tap bajo carga juegan un papel importante en la estabilidad. Luego de un disturbio, las disminuciones de voltaje dan un alivio temporal; sin embargo, en menos de un minuto, el equipo cambiador de tap comienza a restaurar el voltaje del lado de la carga, y por lo tanto la carga.

5. Métodos para el análisis estabilidad de voltaje

5.1. Flujo de potencia continuo.

El análisis de flujo de potencia continuo usa un proceso iterativo involucrando pasos predictor y corrector como es mostrado en Fig. 5.1; de una conocida condición inicial (A), un tangente predictor es usado para estimar la solución (B) para un específico modelo de incremento de carga. El paso corrector determina entonces la solución exacta (C) usando un análisis de flujo de potencia con la carga del sistema asumida a ser ajustada.

Los voltajes para futuros incrementos de carga son entonces predichos basados en un nuevo tangente predictor. Si la nueva carga estimada (D) está ahora más allá de la carga máxima en la solución exacta, un paso corrector con carga ajustada podría no converger; por lo tanto un paso corrector con voltaje ajustado en la barra dada puede ser aplicado para encontrar la solución exacta (E). Como el límite de estabilidad es alcanzado, para determinar la carga máxima exacta la medida de incremento tiene que ser reducida gradualmente durante los pasos sucesivos del corrector.

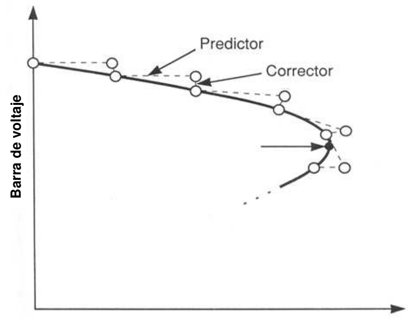


Fig. 5.1 Una secuencia típica de cálculos en un análisis de flujo de potencia continuo.

5.2. Evaluación de la estabilidad de voltaje usando análisis de eigenvalores.

Una forma fácil de identificar el fenómeno de estabilidad de voltaje es por medio del análisis de los eigenvalores de la matriz jacobiana reducida. Esta matriz es obtenida asumiendo que solo hay variación de potencia reactiva en el sistema. Así tenemos la relación entre el vector de variación incremental de potencia reactiva y el vector de variación de módulo de tensión en la barra. La matriz J_R es denominada matriz de sensibilidad Q-V.

$$\begin{bmatrix}\mathbf{\Delta P}\\ \mathbf{\Delta Q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathbf{J}_{P\theta} & \mathbf{J}_{PV}\\ \mathbf{J}_{Q\theta} & \mathbf{J}_{QV}\end{bmatrix}*\begin{bmatrix}\mathbf{\Delta\theta}\\ \mathbf{\Delta V}\end{bmatrix}$$

Ec.5.1

$$\mathbf{\Delta Q}=\mathbf{J}_R\mathbf{\Delta V}\rightarrow\mathbf{J}_R=\left[\mathbf{J}_{QV}-\mathbf{J}_{Q\theta}\mathbf{J}_{P\theta}^{-1}\mathbf{J}_{PV}\right]$$

Podemos descomponer la matriz Jacobiana en matriz Λ (matriz diagonal de J_R), v (matriz de eigenvectores derechos) y w (matriz de eigenvectores izquierdos).

$$\mathbf{J}_R=\mathbf{v\Lambda w} \qquad \text{Ec.5.2}$$

Como es posible normalizar los eigenvectores tal que $w^{-1}= v$ tenemos a partir de Ec. 5.1 y 5.2

$$\mathbf{J}_R^{-1}=\mathbf{v}\Lambda^{-1}\mathbf{w}$$

$$\mathbf{\Delta V}=\mathbf{v}\Lambda^{-1}\mathbf{w}\mathbf{\Delta Q} \qquad \text{Ec. 5.3}$$

$$\mathbf{\Delta V}=\sum_i\frac{\mathrm{v_i w_i}}{\mu_\mathrm{i}}\mathbf{\Delta Q}=\mathbf{\Delta V}=\sum_i\frac{P_i}{\mu_\mathrm{i}}\mathbf{\Delta Q}$$

Donde v_i es la i^{th} columna del eigenvector derecho y w_i la i^{th} fila del eigenvector izquierdo de J_R. Una matriz Pi es definida como los factores de participación de barras para el i-esimo modo. De aquí se deducen los factores de participación de generadores y de ramas.

$$P_{ji}=\frac{\Delta\mathrm{Q}_{\text{pérdidas}}\ \text{para la rama } j}{\text{maximo}\ \Delta\mathrm{Q}_{\text{pérdidas}}\ \text{para todas las ramas}} \qquad \text{Ec. 5.4}$$

$$P_{mi}=\frac{\Delta\mathrm{Q}_{m}\ \text{para la máquina } m}{\text{maximo}\ \Delta\mathrm{Q}_{m}\ \text{para todas las máquinas}} \qquad \text{Ec. 5.5}$$

6. Metodología para el análisis de un sistema

Esta metodología se basa en procedimientos matemáticos, el primero es el flujo de potencia de continuación el cual será desarrollado por la herramienta computacional UWPFLOW utilizada para análisis estático de estabilidad de voltaje. Esta herramienta computacional ha sido usada para estudios de planeación de las redes de potencia de sistemas reales, las características, manual de usuario y software pueden ser obtenidas en [7]. Una vez que la información ha sido ingresada, el UWPFLOW genera perfiles, jacobiano y variables de estado.

El segundo procedimiento matemático es el análisis modal el cual es un análisis de la matriz Jacobiana y su respectiva reducción (J_R). Esta matriz es llevada a la herramienta computacional MATLAB, la cual a través de un algoritmo calculará los eigenvalores y sus respectivos eigenvectores derechos e izquierdos, para luego calcular los factores de participación de las barras del sistema en estudio. Con los resultados obtenidos se plantearán criterios para la selección de contingencias del sistema y lugares adecuados para la compensación de reactivos.

7. Aplicación al sistema nacional interconectado

El SNI está constituido por el sistema de generación, transmisión y las empresas de distribución junto con los grandes consumidores. El sistema de transmisión es administrado por TRANSELECTRIC, que es la encargada de transportar la energía eléctrica a niveles de 138 y 230 KV desde los centros de generación hacia las empresas de distribución y grandes consumidores [10].

Se estudiarán escenarios de alta cargabilidad del sistema, en los cuales se tomarán en cuenta el caso base para épocas de alta hidrología, en condiciones de demanda máxima. Los datos a tomar en cuenta para las simulaciones de flujo de potencia son los datos del 30 Marzo del 2006.

Se considera que la carga del sistema es a potencia activa y reactiva constante y que los transformadores reguladores bajo carga (LTC) no actúan.

7.1. Desarrollo del caso base.

La demanda máxima simulada en bornes de generación es de 2451 MW. El factor de potencia promedio de la carga es 0.97, mientras que las pérdidas de potencia activa y reactiva en el sistema de transmisión para el caso base son de alrededor del 3.11% y 20.45% respectivamente. En la tabla I se muestra el flujo de potencia de los principales generadores:

Tabla I. Generación Caso Base.

Generación	Potencia (Mw)	Potencia (Mvar)
Paute	971	257
Agoyán+ Pucara	222	37
Daule Peripa	135	75
Machala Power	131	21
Esmeraldas	132	8
Gonzalo Cevallos	145	36
AT1- AT2	42	15
Electroquil I	136	26
C.T. Victoria II	101	29
Colombia	200	25

7.2. Análisis modal del caso base del SNI.

De la tabla II se puede notar que una alta participación de factores de barra o barras débiles del sistema se encuentra en la zona de Tulcán–Ibarra para el caso base, esto es aproximadamente un 96% de incidencia.

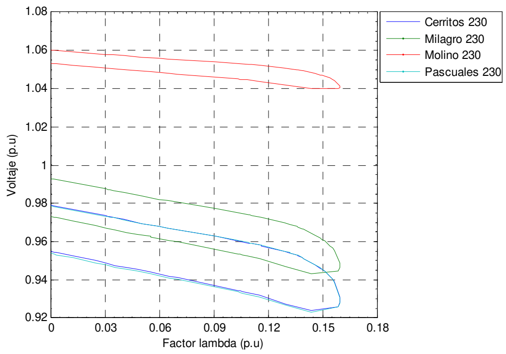
Tabla II. Factores de Participación de Barras

Barras	Porcentaje (%)
'Ibarra 2 13.8'	20,17
'Tulcan 13.8'	16,61
'Ibarra Moy 69'	16,34
'Tulcan 69'	10,37
'Panamericana 115'	7,42
'Panamericana 138'	6,73
'Tulcan 138'	6,30
'Ibarra 1 13.8'	6,02
'Ibarra 69'	3,02
'Ibarra 138 '	1,83

El margen de cargabilidad mediante el flujo de potencia continuo es de 0,15969.

7.3. Curvas PV del Sistema Nacional Interconectado.

Mediante el método de continuación se obtienen los perfiles de voltaje de las barras a 230 KV del SNI, los cuales se muestran en la figura 7.1.



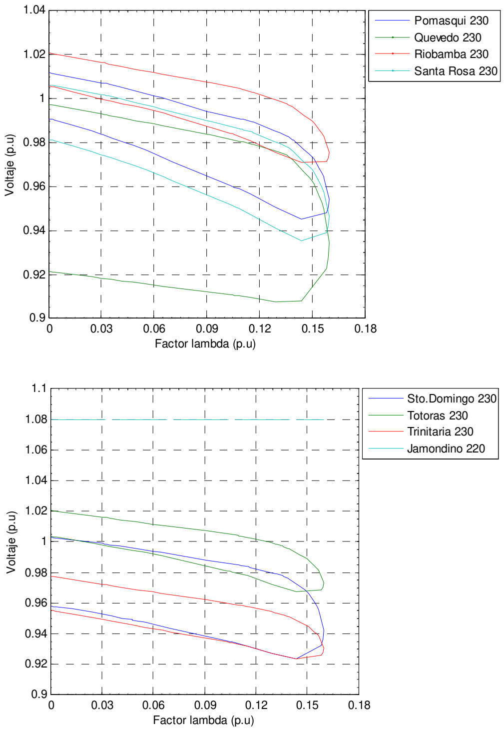


Figura 7.1 Perfiles de voltaje del SNI – Barras 230 KV

Cabe indicar que el voltaje de colapso en la barra Molino 230 es de 1.04 p.u. En Quevedo 230 cabe indicar que su pendiente es similar a la de las demás barras del sistema hasta un nivel de voltaje de 0.97 p.u, a partir de este valor se puede notar un serio decaimiento en el voltaje de esta barra llegando a un valor de voltaje 0.93 p.u en el punto crítico. Esto se debe a que su principal y única fuente de soporte de reactivo (Daule Peripa) ha perdido el control de voltaje a un nivel de cargabilidad del 13%.

7.4. Análisis modal para máxima cargabilidad del SNI.

De la tabla III se puede notar que una alta participación de factores de barra o barras débiles del sistema se encuentra en la zona de Manta, Portoviejo, Daule Peripa y Chone para condiciones de máxima cargabilidad, esto es aproximadamente un 62% de incidencia en el colapso del sistema seguido de un 12% de incidencia de las zonas de Esmeraldas, Santo Domingo y Quevedo.

Tabla III. Factores de Participación de Barras

Barras	Participación (%)
'Manta 69'	11,06
'Portoviejo 69'	8,83
'Portoviejo 138'	6,53
'Portoviejo 1 13.8'	4,90
'Portoviejo 2 13.8'	4,77
'Chone 13.8'	4,17
'Chone 69'	4,13
'Severino 138'	3,73
'Chone 138'	3,73
'Daule Peripa 138'	2,94
'Daule Peripa U1-U2-U3'	2,55
'Quevedo 1 13.8'	1,67
'Quevedo 138'	1,52
'Quevedo 2 13.8'	1,51
'Quevedo 69'	1,51

7.5. Curva VQ para máxima cargabilidad.

La figura 8.2, muestra las curvas VQ y los márgenes de reactivos para la zona de Portoviejo. Como se observa en la gráfica, el vértice de las curvas coincide con el eje horizontal, lo cual indica la operación de estas barras en el punto crítico de colapso, con un margen de reactivos de cero MVAR, esto es una característica típica en condiciones de máxima cargabilidad.

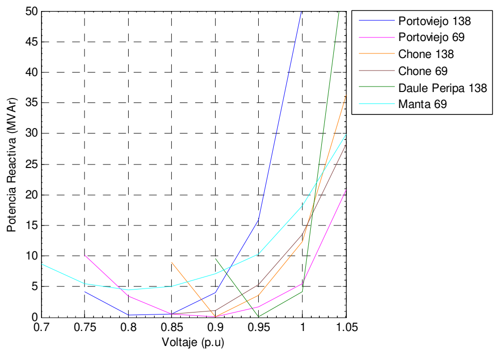


Fig. 7.2 Curvas QV – Zona de Portoviejo

7.6. Respuesta de potencia reactiva de las unidades de generación del SNI ante variación de la carga.

Para mayor visualización del comportamiento de los generadores se procede a graficar la potencia reactiva en función de la variación del parámetro lambda:

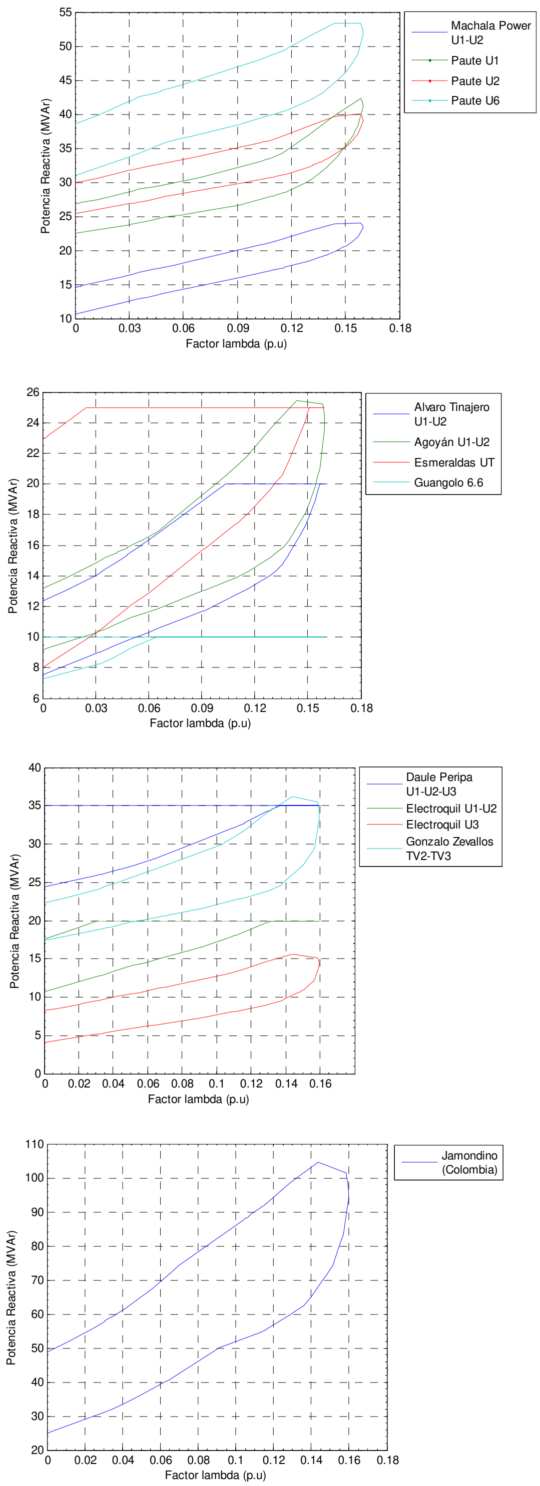


Fig. 7.3. Potencia reactiva dada por los generadores

De las figuras 7.3 se puede resumir en una breve tabla cómo las unidades de generación han respondido ante los incrementos de carga en la entrega de potencia reactiva y a su vez cómo alcanzan su nivel límite. La tabla IV muestra el orden en cómo los generadores alcanzan su límite de reactivos a medida que el nivel de carga es incrementado.

Tabla IV. Generadores que alcanzan su límite reactivo a diferentes niveles de cargabilidad

GENERADOR	λ (p.u)
Electroquil U2	.13181
Electroquil U1	.13200
Santa Rosa GG	.13602
Daule Peripa U1-U2-U3	.13631
Aníbal Santos	.13884
Pucara U1-U2	.13941
Esmeraldas UT	.15105
Álvaro Tinajero U1-U2	.15681

7.7. Análisis de contingencia de líneas en condiciones de máxima cargabilidad.

A continuación en esta sección analizaremos la salida de una línea de transmisión a 230 KV.

Tabla V. $\lambda_{crítico}$ del SNI después de una contingencia

Contingencia de la línea	λ (p.u)
Jamondino220 - Pomasqui 230 (1)	0,0920
Molino 230 – Pascuales 230 (1)	0,1261
Molino 230 – Riobamba 230	0,1300
Molino 230 – Milagro 230 (1)	0,1300
Molino 230 – Totoras 230	0,1340
Totoras 230 - Sta. Rosa 230 (1)	0,1400
Pascuales 230 – Quevedo 230 (1)	0,1483
Quevedo 230 – Sto. Domingo 230 (1)	0,14897

Como se puede observar en la tabla V la contingencia más crítica a nivel de 230 KV sería la salida de una línea de doble circuito de la línea de transmisión Jamondino–Pomasqui (1). El margen de cargabilidad del sistema es de λcritico = 0,092 p.u. esto es una potencia máxima en bornes de generación de 2702,6 MW y un nivel de pérdidas en el sistema de transmisión de 4.16%.

7.8. Análisis de indisponibilidad de generadores en condiciones de máxima cargabilidad.

De la tabla VI se puede observar que la indisponibilidad más crítica, con la salida de una unidad de generación es la interconexion con Colombia, con una reducción en el margen de cargabilidad del sistema de 6.028. %.Esta condición de operación del sistema limita en gran proporción su reserva.

Tabla VI. $\lambda_{crítico}$ del SNI frente a la salida de los principales generadores

Indisponibilidad de un generador	λ(p.u)
Jamondino (265 MW)	0.06028
Daule peripa (71 MW)	0,08580
Esmeraldas (133 MW)	0,11319

7.9. Efecto de compensación reactiva en el perfil de voltaje en zonas críticas.

Para el diseño del SVC [11], en la zona de Manta se ajustó la barra a un voltaje de 0.98 en el punto de nivel máximo de carga Ptotal= 2756 MW, esto indicó que la potencia reactiva necesitada es alrededor de 10 MVAr. En el SVC se asume que el rango inductivo es igual al capacitivo, por lo tanto $Q_{SVC}=\pm 10$ MVAr. La pendiente del SVC es 2%. El voltaje en la barra es de 69 Kv. El SVC es colocado en la barra a través de un transformador reductor de 13.8 Kv y su reactancia equivalente es de 1% con respecto a su propia base que es la misma base para el SVC.

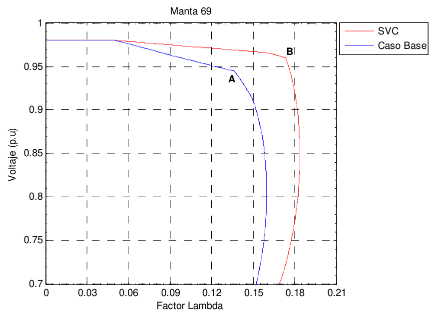


Fig. 7.4. Perfil de voltaje con el SVC en la barra más crítica.

Conclusiones

- El margen de cargabilidad máximo del Sistema Nacional interconectado desde el punto de vista de estabilidad de voltaje es alrededor de 15.9%, esto es un valor de demanda en bornes de generación de 2862 MW en potencia activa y 1178 MVAr en potencia reactiva. Por lo cual el sistema tiene un margen de reserva de 410 MW y 495 MVar dentro del cual el sistema es estable.
- Dado que tanto en el caso base como en el punto de colapso el área norte siempre tuvo altos factores de participación, concluimos que el SNI está operacionalmente dividido en dos áreas (norte y sur) y que el área norte es la que tiene más problemas en cuanto a estabilidad de voltaje.
- En cuanto a contingencias de líneas a nivel de 230Kv, la salida de la línea de doble circuito Jamondino – Pomasqui disminuye el nivel de cargabilidad del SNI a 9.203%, lo cual deja su margen de reserva en 251MW en potencia activa y 407 MVar en potencia reactiva.
- En cuanto a contingencias de generadores tenemos que Jamondino/Pomasqui es la salida más crítica de generadores porque deja al SNI en un nivel 6.03% de cargabilidad, esto es 151 MW y 189 MVar de reserva. En segundo lugar tenemos la salida de una unidad de Daule Peripa, esta contingencia reduce la cargabilidad del SNI a 8.6% que equivale a dejar el SNI con 220 MW y 234 MVar de reserva. La salida de una segunda unidad de Daule Peripa dejaría al SNI sin un considerable margen de reserva.

Referencias.

[1] Adriano Alcívar A.,Dalton Maridueña F.,Christian Larrosa A. "Análisis Estático de Estabilidad de Voltaje Aplicado al Sistema Nacional Interconectado" (Tesis Facultad De Ingeniería Eléctrica y Computación, Escuela Superior Politécnica Del Litoral, año 2007).

[2] C. W. Taylor, Power System Voltage Stability. New York: McGraw-Hill, 1994

[3] T. Van Cutsem, Voltage Stability of Electric Power Systems, Kluwer Academic Publishers. 1998

[4] Prabha Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill.1994

[5] "Voltage Stability Assessment: Concepts, Practice and Tools", IEEE Special Publication, SP101PSS, 2002

[6] V. Ajjarapu y C. Christy, "The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis," IEEE PICA Conference Proceedings, Mayo 1991, pp.304-311

[7] C. A. Cañizares, "UWPFLOW: Continuation and Direct methods to Locate Fold Bifurcations In AC/DC/ FACTS Power Systems," Universidad de Waterloo, www.power.uwaterloo.ca

[8] V. Ajjarapu y C. Christy, "The Application of a Locally parameterized Continuation technique to the Study Steady State Voltage Stability", Proceedings of 21st annual north American Power Symposium, Rolla, Missouri, Octubre 1989.

[9] C. A. Cañizares, "On bifurcations, Voltage Collapse and Load Modelling," IEEE Transactions on power systems, vol. 10. No 1, Febrero 1995, pp 512-522.

[10] "Informe de gestión de la corporación nacional de control de energía (CENACE), informe trimestral Enero-Marzo del 2006.

[11] C. A. Cañizares, Zeno T. Faur, "Analysis of SVC and TCSC Controllers in voltage Collapse", IEEE Transactions on power systems, vol. 14. No 1, February 1999, pp 158-165.