ANALISIS DE SENSITIVIDAD DE VOLTAJE APLICADO A UN SISTEMA ELECTRICO UTILIZANDO EL METODO DE VALORES PROPIOS

Ing. Pablo Cisneros G.
Corporación Centro Nacional de Control de Energía- CENACE
Email: pcis@ieee.org
Quito - Mayo 2000

RESUMEN: La transmisión eléctrica en C.A. es posible solo si se cumplen dos requerimientos básicos como son:

- Las máquinas sincrónicas deben permanecer en sincronismo.
- El voltaje debe estar cerca de sus valores nominales.

Se analizará exclusivamente este último requerimiento. Los elevados voltajes llevarían en las líneas a una rotura en la cadena de aisladores, en el caso de los transformadores, se producen corrientes ricas en armónicos pudiendo ocasionar problemas de ferroresonancia en presencia de capacitores.

Los voltajes mínimos afectan a un sistema llevándolo lentamente a una inestabilidad o un colapso por voltaje. En el S.N.I; se presentan zonas (Norte: Sta. Rosa, Manabí; y, Sur: Loja y el Oro) con elevados déficits de reactivos, que son los que dan un soporte directo a los voltajes.

En este artículo, se aborda el tema de falta de reactivos utilizando la técnica de la sensibilidad de las barras ante cambios de potencia que pueden llevar al sistema a una inestabilidad por voltaje; para ello, se utiliza el método de los eigenvalores y eigenvectores los mismos que identifican los factores de participación de las barras o la cercanía hacia la inestabilidad de voltaje.

Luego se realiza un ejemplo utilizando esta metodología, para el sistema de la Empresa Eléctrica de Esmeraldas EMELESA, para lo cual, se utiliza un programa existente [2] desarrollado en MATLAB.

ABSTRACT: The AC power transmission is feactible only is two basis requirements exist.

- Synchronus machines must stay in sincronism.
- Voltage levels must be close to their nominal values

This last requirement is analized exclusively. The highest voltage could carry a breaking in the isolator chains, in the case of the transformers, current with full armonics could produce problems of ferroresonance with presence of capacitores. The minimum voltages damage the system by carrying instability status slowly of becoming a collapse for voltage. The S.N.I. has zones with the highest lack of reactives which give a direct support to the voltages. (Norte: Sta. Rosa, Manabi; and Sur: Loja y El Oro).

This article analizes the lack of reactives by using the technique of the sensitive of bus in front of changes of power that can carry the system to a voltage instability by using the eigenvalues and eigenvectors, method for identity the participation factors of bus or close of the instability voltage.

For instance, for EMELESA system, this method is applied by using a program developed by MATLAB

INTRODUCCION: En el S.N.I; se tienen zonas con grandes déficits de reactivos que son los que dan un soporte directo a los voltajes, estas zonas se encuentran tanto en el norte del país zona de la S/E Sta. Rosa como en la costa con zonas como Manabí y El Oro y en la sierra: Loja.

Existen diversos métodos para compensar esas necesidades de reactivos como son: capacitores shunt, capacitores serie condensadores síncronos, etc. Sin embargo, antes de utilizar estos métodos se debe analizar la sensitividad del sistema frente a un "generador" de reactivos, ya que no necesariamente el uso óptimo de éstos será en la barra de más bajo voltaje, es por ello que se propone un estudio en base de los valores propios, los mismos que darían una indicación de la ubicación óptima en el sistema.

Brevemente, el método de los valores propios se basa en los eigenvalores o modos que se obtienen de la matriz Jacobiana de flujos de potencia. Los eigenvalores de la matriz Jacobiana reducida identifican los diferentes modos, a través de los cuales, el sistema podría llegar a presentar una inestabilidad de voltaje. La magnitud de los eigenvalores proporciona una medida relativa de la proximidad a la inestabilidad. Los eigenvectores calculados representan los factores de participación de las barras, los cuales a su vez, determinan las áreas asociadas con cada modo (eigenvalor).

1 TECNICAS PARA EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE

Las técnicas para el estudio de la Estabilidad de Voltaje pueden dividirse en dos grupos:

a) Análisis Dinámico
b) Análisis en Estado Estable

a) Análisis Dinámico

Utiliza una técnica no-lineal de simulación en el dominio del tiempo, pero estas simulaciones no proporcionan una información sensitiva y fácil de analizar, por lo que generalmente, requieren de un tiempo y esfuerzos en

ingeniería adicionales para su análisis e interpretación de resultados, esto se debe a que muchos parámetros tienen que ser monitoreados y revisados cuidadosamente antes de poder emitir algunas conclusiones.

b) Análisis en Estado Estable

Está basada en la formulación de flujos de potencia. este análisis proporciona respuestas referentes a dos importantes aspectos como son: el margen de estabilidad de voltaje y el mecanismo de la inestabilidad de voltaje.

Para determinar el margen de estabilidad de voltaje, al sistema se lo "forza", paulatinamente hasta el punto en que ocurre la inestabilidad de voltaje.

2 TECNICAS DE ANALISIS LINEAL PARA EL ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE

La mayoría de las técnicas de análisis se basan en ecuaciones linealizadas de flujos de potencia.

Las técnicas de análisis lineal más conocidas son las siguientes:

a) Análisis de Sensitividad V-Q
b) Descomposición del Valor Singular
c) Análisis Modal

El análisis de sensitividad V-Q determina la estabilidad de voltaje del sistema, basado en el signo de la sensitividad de la magnitud de voltaje en la barra, o lo que es lo mismo conocer que tanto cambia el voltaje con la inyección de reactivos. Una sensitividad V-Q positiva significa que el voltaje en la barra se incrementa si se inyecta potencia reactiva en la misma barra.

El sistema posee estabilidad de voltaje si todas las sensitividades V-Q son positivas y en cambio, se dice que el sistema es inestable si la sensitividad V-Q es negativa, para al menos una barra. La sensitividad depende de la robustez del sistema, el nodo eléctrico que presente un nivel de corto-circuito más grande será el nodo más fuerte; es decir, este nodo será el más difícil de controlar ante una inyección de reactivos.

3 ANALISIS DE SENSITIVIDAD V-Q

Las ecuaciones linealizadas de un sistema de potencia en estado estable son:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

Ec.(1)

Donde:

ΔP= cambio incremental en la potencia real de la barra
ΔQ= cambio incremental en la inyección de potencia reactiva en la barra
$\Delta\theta$= cambio incremental en el ángulo de voltaje de la barra
ΔV= cambio incremental en la magnitud de voltaje en la barra

Los elementos de la matriz Jacobiana proporcionan la sensitividad entre el flujo de potencia y los cambios de voltaje en la barra.

Si se usan los modelos convencionales de flujos de potencia para el análisis de estabilidad de voltaje, la matriz Jacobiana de la ecuación (1), tienen la misma forma que el Jacobiano formado para resolver las ecuaciones normales de flujos utilizando la técnica de Newton Raphson.

La estabilidad de voltaje de un sistema es afectada tanto por la potencia real (P) como por la potencia reactiva (Q). Sin embargo, en cada punto de operación podemos mantener constante (P) y evaluar la estabilidad de voltaje considerando las relaciones incrementales entre Q y V.

Si en la ecuación (1) asumimos que $\Delta P=0$ se tiene:

$$J_{PQ}\ \Delta\theta = -J_{PV}\ \Delta V$$

$$\Delta\theta = -\ J_{PQ^{-1}}\ J_{PV}\ \Delta V$$

$$\Delta Q = J_{Q\theta}\ \Delta\theta + \ J_{QV}\ \Delta V$$

$$\Delta Q = (-\ J_{Q\theta}\ J_{PQ^{-1}}\ J_{PV} + \ J_{QV}\ )\ \Delta V$$

Donde:

$$J_R = J_{QV} - J_{Q\theta}\ J_{PQ^{-1}}\ J_{PV}$$

Ec.(2)

J_R es conocida como la matriz reducida del sistema en estado estable. Esta matriz representa la relación linealizada entre los cambios incrementales de las magnitudes de voltaje en barra (ΔV) y la inyección de potencia reactiva en la barra (ΔQ) por tanto:

$$\Delta V = J_{R^{-1}}\ \Delta Q$$

Ec.(3)

$$\Delta Q = J_R\ \Delta V$$

Donde J_R^{-1} es el Jacobiano V-Q reducido. Su i^{esimo} elemento diagonal es la sensitividad V-Q en la barra i.

4 ANALISIS MODAL

La técnica del análisis modal/eigenvalor, involucra el cálculo computacional de los eigenvalores y eigenvectores asociados a su matriz Jacobiana reducida, definida por la ecuación (2), generado a partir de un sistema de potencia estable. Los eigenvalores de la matriz Jacobiana reducida identifican los diferentes modos a través de los cuales, el sistema podría llegar a presentar una inestabilidad de voltaje. La magnitud de los eigenvalores proporciona una medida relativa de la proximidad a la inestabilidad

El significado de los modos

La relación linealizada entre el voltaje en la carga y su potencia reactiva, puede representarse por medio de la siguiente ecuación (sensitividad):

$$\lambda \, \Delta V = \Delta Q$$

Donde λ puede ser considerada como el Jacobiano de la red o la sensitividad V-Q. También es posible tomar a λ como el eigenvalor del jacobianao de la red.
Si $\lambda 1$ es cercano a cero, un cambio pequeño en la carga de la barra 1 puede repercutir en un cambio grande en el voltaje de la misma barra. Sin embargo, las otras barras no son afectadas, por lo tanto, el colapso de voltaje solamente se representa en la barra 1.

Lamentablemente, las matrices Jacobianas de los sistemas de potencia no son matrices diagonales. Sin embargo, se tiene la posibilidad de diagonalizar estas matrices utilizando la técnica de análisis modal. Con esta técnica, es posible obtener la relación de voltaje - potencia reactiva.

$$\begin{bmatrix} \lambda 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \lambda n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v1 \\ \Delta v2 \\ \cdots \\ \Delta vn \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta q1 \\ \Delta q2 \\ \cdots \\ \Delta qn \end{bmatrix}$$

Donde:

$$[\Delta v] = [\xi][\Delta V]$$

$$[\Delta q] = [\xi][\Delta Q]$$

$$[\xi] = \textit{matriz de eigenvectores de } [J]$$

Los vectores [Δv] y [Δq] tienen las mismas unidades que [ΔV] y [ΔQ] respectivamente. Estos vectores son la combinación lineal del voltaje físico y la potencia reactiva y se les puede llamar a su vez "voltaje modal" y "potencia reactiva modal". A manera de ejemplo, el siguiente eigenvector para el modo crítico [ξ crítico] = [10, 20, 0.1, 0, 12, 0.5] tiene grandes multiplicadores en las barras 1, 2 y 5, esto significa que cualquier cambio pequeño en la carga de las barras resulta en un cambio muy grande en la potencia reactiva modal, lo cual provoca a su vez un cambio muy grande en el voltaje modal, por tanto estas barras son las más vulnerables y propensas al colapso de voltaje.

La implementaron de esta idea aplicada en los sistemas eléctricos de potencia involucra en general dos pasos:

1) Formación de la matriz Jacobiana de estado estable del sistema.

2) Análisis de los eigenvalores o eigenvectores de la matriz Jacobiana reducida.

5 EIGEN-ANALISIS DE J_R Y MODOS DE LA INESTABILIDAD DE VOLTAJE

Las características de estabilidad de voltaje de un sistema pueden ser identificadas mediante el cálculo de eigenvalores o eigenvectores de la matriz Jacobiana reducida, definida en la ecuación (2), de ésta se tiene:

$$J_R = \xi \, \Lambda \, \eta \qquad \text{Ec.(4)}$$

Donde:

ξ = matriz de eigenvectores derechos normalizados de J_R
η = matriz de eigenvectores izquierdos normalizados de J_R
Λ = matriz diagonal de eigenvalores de J_R

De la ecuación 4.

$$J^{-1}{}_R = \xi \, \Lambda^{-1} \, \eta$$

sustituyendo en la ecuación (3) se tiene:

$$\Delta V = \xi \, \Lambda^{-1} \, \eta \, \Delta Q \qquad \text{Ec.(5)}$$

o también

$$\Delta V = \sum_i \frac{\xi \, \eta_i}{\lambda_i} \Delta Q$$

donde ξi es la i^{esima} columna eigenvector derecho y ηi i^{esima} fila eigenvector izquierdo de J_R . Cada eigenvalor λi y los correspondientes eigenvectores derecho e izquierdo ξi y ηi definen el i^{esima} modo de respuesta Q-V.

Debido a que ξ-1 = η, la ecuación (5) puede ser escrita como:

$$\eta\, \Delta V = \Lambda^{-1}\, \eta\, \Delta Q$$

$$v = \Lambda^{-1}\, q$$

Ec.(6)

Donde

= η ΔV es el vector de variaciones de voltajes modales
= η ΔQ es el vector de variaciones de potencia reactiva modales.

La diferencia entre las ecuaciones (3) y (6) es que Λ^{-1} es una matriz diagonal mientras que J^{-1}_R, en general, es no diagonal, la ecuación (6) representa ecuaciones desacopladas de primer orden.

Por lo tanto, para el i^{esima} modo se tiene que:

$$v_i = \frac{1}{\lambda_i}\, q_i$$

Si $\lambda i > 0$, el i^{esima} voltaje modal y la i^{esima} variación de potencia reactiva modal están a lo largo de la misma dirección, indicando con esto que el sistema presenta estabilidad de voltaje.

Si por el contrario, $\lambda i < 0$, el i^{esima} voltaje modal y la i^{esima} variación de potencia reactiva modal se encuentran a lo largo de direcciones opuestas, indicando que el sistema tiene una inestabilidad de voltaje; la magnitud de cada variación de voltaje modal es igual a la inversa de λi veces la magnitud de la variación de potencia reactiva modal.

Se tiene entonces, que la magnitud de λi, determina el grado de estabilidad del i^{esima} voltaje modal. La más pequeña magnitud positiva de λ indica que el i^{esima} voltaje modal más cercano a ser inestable. Cuando λi = 0, el i^{esima} voltaje modal se colapsa debido a que cualquier cambio en la potencia reactiva modal provoca cambios infinitos en ese voltaje modal.

6 PROGRAMAS UTILIZADOS

Con la técnica de valores propios explicada en los puntos anteriores y utilizando programas y subrutinas existentes en MATLAB, entre los que se puede citar: la subrutina que encuentra la matriz Jacobiana (ésta utiliza la técnica de dispersamiento de matrices), la subrutina que resuelve flujos de potencia, y sobre todo el programa STALVOT-**Análisis de estabilidad de voltaje mediante la Técnica de Análisis Modal** de la referencia [2], programa que utiliza las subrutinas antes mencionadas, se procede con el cálculo que a continuación se detalla:

7 CASO EN ESTUDIO

Inicialmente se ha escogido el sistema de la Empresa Eléctrica ESMERALDAS (figura 1) el mismo que representa una parte del S.N.I. para realizar el estudio de estabilidad de voltaje [5].

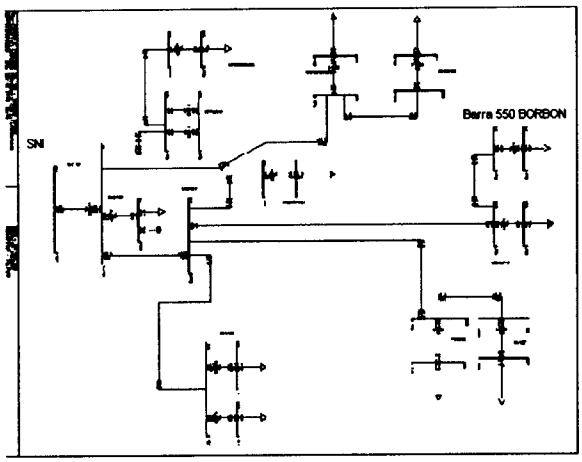


Figura N-1

7.1 INTRODUCCION DE DATOS

Datos de Barras para el sistema ESMERALDAS

# de barra		Angu.	Pg	Qg	Pl	Ql			tipo	
52	1	0	0.4	0.1	0	0	0	0	1	99
54	0.9	-3.92	0	0	0	0	0	0	3	0
252	0.9	5.11	0	0	0	0	0	0	3	0
352	0.9	5.11	0	0	0	0	0	0	3	0
541	0.9	-4.42	0	0	0	0	0	0	3	0
542	0.9	-4.94	0	0	0.11	0.04	0	0	3	0
543	0.9	-4.48	0	0	0	0	0	0	3	0
544	0.9	-4.52	0	0	0.01	0.01	0	0	3	0
545	0.9	-4	0	0	0	0	0	0	3	0
546	0.9	-4	0	0	0	0	0	0	3	0
547	0.9	-4.58	0	0	0.01	0	0	0	3	0
549	0.9	-5.85	0	0	0	0	0	0	3	0
550	0.9	-5.92	0	0	0.02	0.01	0	0	3	0
551	0.9	-4.39	0	0	0.09	0.03	0	0	3	0
552	0.9	-4.59	0	0	0	0	0	0	3	0
553	0.9	-4.57	0	0	0	0	0	0	3	0
554	0.9	-5.24	0	0	0	0	0	0	3	0
555	0.9	-5.38	0	0	0.01	0	0	0	3	0

Tabla N-1

Los datos del sistema de ESMERALDAS se introdujeron según el formato siguiente, número de barra, voltaje y ángulo en la barra, potencia (P) y (Q) generada en la barra, potencia (P) (Q) de la carga, conductancia y suceptancia, código de la barra etc.

Este sistema consta de 28 barras, en la Tabla N-1 se muestra algunos de estos datos.

8 RESULTADOS DEL PROGRAMA

Luego de ejecutar el programa STALVOLT se tiene los siguientes resultados:

1) la matriz de eigenvalores es la siguiente

eigval = 0
5.3853
1.8283
1.3202
0.8780
-0.4744
0.4329
0.3760
0.3213
0.2485
0.1583
0.1417
0.1003
0.0674
0.0000
0.0037
0.0654
0.0475
0.0119
0.0167
0.0200
0.0350
0.0198
0.0320
0.0273
0.0295
0.0301
0.0283

Tabla N-2

El Eigenvalor dominante es: 5.3853
El máximo Eigenvector Registrado es: 0.2873
El Número de Barra Correspondiente es la número: 550

2) el archivo correspondiente a los eigenvectores es el siguiente

Posición	Valores de la matriz	
1	0E+00	0.000E+00
2	0E+00	1.387E-01
3	0E+00	1.511E-01
4	0E+00	1.712E-01
5	0E+00	1.510E-01
6	0E+00	1.496E-01
7	0E+00	1.547E-01
8	0E+00	1.526E-01
9	0E+00	1.394E-01
10	0E+00	1.403E-01
11	0E+00	1.687E-01
12	0E+00	2.836E-01
13	0E+00	**2.873E-01**
14	0E+00	1.407E-01
15	0E+00	1.638E-01

Tabla N-3

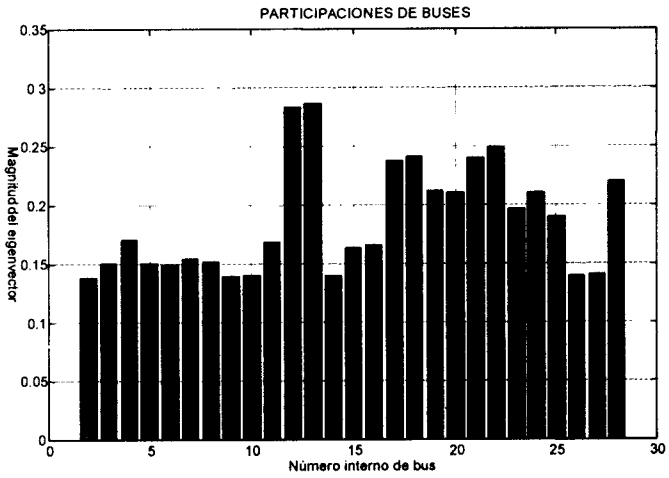
9 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Antes de analizar los resultados se recuerda que los eigenvalores son los valores que se encuentran en la diagonal principal de la matriz, cada uno de ellos tiene un vector columna asociado.

Los eigenvectores identifican los diferentes modos, estos sirven para identificar la participación o cercanía (con relación a otras barras) que se tiene hacia la inestabilidad de voltaje.

Con estas definiciones, se tiene que en el vector de eigenvalores (Tabla N-2) el valor más grande es 5.3853 el mismo que se encuentra en la posición "numero dos" de dicho vector, esta posición indica la columna a analizar en el archivo correspondiente a los eigenvectores (Ver Tabla N-3). En esta columna el valor más grande, es 2.873E-01, el mismo que se encuentra en la posición numero 13 de este archivo.

Para conocer a que barra corresponde el máximo eigenvector encontrado, se debe ubicar al archivo original de datos de barra (Tabla N-1); y se encuentra que barra ocupa la posición 13, también esta búsqueda se puede simplificar mediante el siguiente gráfico:



Para el caso en estudio se observa que la barra que ocupa la posición 13 es la barra número 550 que se denomina BORBON (Ver figura N-1), siendo ésta la más sensible a los cambios de potencia reactiva.

Los eigenvectores representan los modos o valores propios, los mismos que serán iguales al número de la barra, por ejemplo el valor de 5.3853 indica cuán cerca de la inestabilidad se encuentra esta barra; o también, que esta barra presenta la más alta participación ante la contingencia sucedida, ya que como se indicó en el punto 1 literal (b), al sistema en estudio se lo "forza o se lo somete" a una variación de potencia, la misma que puede representar una contingencia.

Por tanto como resultado de la ejecución de este programa se conoce cual es la barra más sensible ante este cambio de potencia en el sistema.

10 CONCLUSIONES

- Con el programa STALVOLT y con los diversos toolbox de MATLAB, se puede realizar estudios similares para sistemas mucho más grandes, como es el caso del Sistema Nacional Interconectado, en su totalidad.

- El resultado de la ejecución de este programa, es conocer cuál es la barra más sensible del sistema en estudio, ante una contingencia o ante una variación de potencia. Esta información también servirá para conocer que esta barra es la más indicada para aprovechar el uso, por ejemplo, si se piensa instalar capacitores en el sistema.

COLABORACION

Se agradece la estrecha colaboración del Ing. Daniel León de Comisión Federal de México. Al Ing. Luis Pesantez de TRANSELECTRIC, con quien se está trabajando en la aplicación de esta metodología y en la utilización de los programas existentes en MATLAB para ser aplicados en el S.N.I..

BIBLIOGRAFIA

[1] APLICACIÓN DEL SIMULADOR PSS/E PARA ESTUDIOS EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA.
Curso impartido por Personal de la Unidad de Ingeniería Especializada de la Comisión Federal de Electricidad de México. QUITO Abril 1998.

[2] PROGRAMA PARA ANALISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE MEDIANTE LA TECNICA DE ANALISIS MODAL.
Autor: Daniel León R.
México D.F. Marzo 1998

[3] CIGRE Task Force 38-02-10, Modelling of Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena 1993.

[4] CIGRE Working Group 38.01, Planning Against Voltage Colapse" Electra pp 55-75 March 1987.

[5] Datos proporcionados por TRANSELECTRIC S.A. QUITO 1999

BIOGRAFIA. Pablo Cisneros Gárate nació en Cuenca, Ecuador, el 15 de Octubre de 1965. Graduado de Ingeniero Eléctrico en la Universidad de Cuenca en 1991, obtuvo el Masterado en Sistemas de Potencia en la Universidad de Lovaina, Bélgica. Experiencia profesional en Empresa Eléctrica de Cuenca en Redes Subterráneas desde 1991 hasta 1994. Empresa Tractebel-Bélgica en Centrales de Ciclo Combinado, en Italia (Rosignano-Solvay) y en Chile (Nehuenco). Actualmente, trabaja en Ecuador para la Corporación Centro Nacional de Control de Energía-CENACE.