

COLAPSOS DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE POTENCIA

Carlos Julio Zapata G.

Consultoría Colombiana S. A.
Santafé de Bogotá, D. C.

RESUMEN

Las limitaciones de tipo económico y ambiental y la operación de los sistemas de potencia bajo un ambiente desregularizado incorporan un nuevo factor en el planeamiento y la operación de los sistemas de potencia: La Estabilidad de Voltaje.

PALABRAS CLAVES

Desregularización, Reactivos, Estabilidad de Voltaje, Colapso de Voltaje.

INTRODUCCION

La estabilidad de voltaje está directamente relacionada con el balance de energía reactiva en el sistema de potencia bajo condiciones normales y anormales. Cuando existe déficit de reactivos se produce una disminución en la magnitud del voltaje que acciona los sistemas de control para restaurarla a su valor normal de operación. Si el déficit de reactivos persiste, el decremento en la magnitud del voltaje continúa hasta violar los límites de operación del sistema lo cual acciona los sistemas de protección provocando la salida de líneas y/o generadores agravándose aún más el déficit, lo que puede llevar al colapso del sistema.

La estabilidad de voltaje está manejada por la dinámica de las cargas y específicamente por su capacidad de mantener características de potencia constante. Por esto, la estabilidad de voltaje también se conoce como estabilidad de la carga. Ver la figura 1.

Se dice que un sistema experimenta inestabilidad de voltaje cuando debido a una perturbación presenta una caída continua e incontrolable en la magnitud del voltaje. La inestabilidad de voltaje no conduce necesariamente al colapso de voltaje. El colapso de voltaje es uno de los problemas de inestabilidad de voltaje.

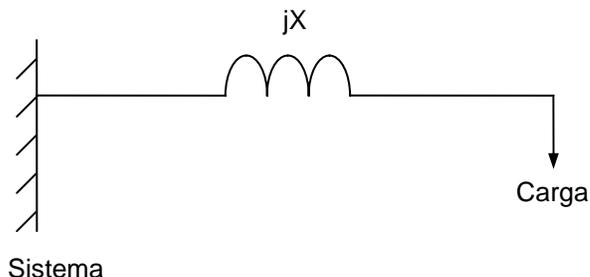


Figura 1. Concepto de estabilidad de voltaje.

El colapso de voltaje se caracteriza por una disminución inicial lenta en la magnitud de voltaje y una caída brusca final. Este proceso se extiende en períodos de segundos hasta los 30 minutos.

El estudio de reactivos en los sistemas de potencia es bien conocido y se encarga de determinar la cantidad de compensación reactiva para la corrección del factor de potencia, minimizando las pérdidas y determinando su localización óptima. Sin embargo este análisis no está relacionado con la estabilidad de voltaje.

El problema de estabilidad de voltaje se conoció hace mucho tiempo para los sistemas radiales pero en los grandes sistemas de potencia no se consideró de importancia este tipo de problema y los análisis se centraron sobre la estabilidad angular, aunque se reportan casos de colapso de voltaje desde 1970. A partir de la década de los ochenta se empiezan a reportar con más frecuencia problemas de estabilidad de voltaje en todo el mundo lo cual ha motivado una intensa búsqueda de métodos de análisis para determinar su presencia y forma en que se desarrolla y para determinar técnicas para el planeamiento y operación de los sistemas de potencia.

Como ejemplo, se pueden mencionar casos de inestabilidad de voltaje y colapso de voltaje en los sistemas francés (1978, 1987), sueco (1983), japonés (1987), canadiense (1979) y americano (1970, 1977, 1982, 1985) los cuales se encuentran descritos con gran detalle en la referencia [1].

CONDICIONES BAJO LAS CUALES SE PRESENTAN
PROBLEMAS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE

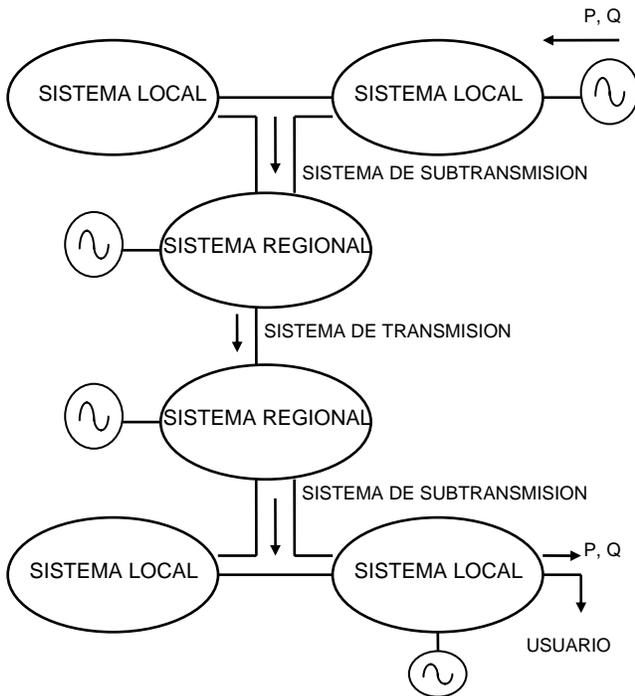


Figura 2. Operación en un ambiente desregularizado.

El problema de estabilidad de voltaje se presenta en sistemas que operan bajo algunas de las siguientes condiciones:

- El sistema de potencia está fuertemente cargado por lo cual no cuenta con reserva para atender demandas excepcionales de energía temporalmente.

Estas demandas excepcionales de energía se pueden presentar por un aumento anormal de la carga, Ejemplo: Condiciones climáticas extremas, ó a la pérdida de un elemento como un generador, transformador o línea, debido a una falla. El uso de las redes de un sistema para transferir potencia entre otros sistemas (Wheeling) representa una carga adicional.

- Existe importación de potencia activa y reactiva a grandes distancias o desde otros sistemas lo que puede comprometer la seguridad del sistema al presentarse pérdida de la conexión, por ejemplo debido a una falla en una línea de transmisión, especialmente si el sistema no tiene reserva para atender la generación que se perdió.

Estas condiciones aparecen como consecuencia de:

- Limitaciones de tipo energético: No existen fuentes de energía cerca de los centros de consumo, por lo cual se deben construir plantas de generación en sitios alejados ó importar energía desde otros sistemas.
- Limitaciones de tipo económico: No existe suficiente capital para adelantar nuevos proyectos de generación y transmisión. Esto implica la importación de energía desde otros sistemas y la sobrecarga de los elementos de transmisión como líneas y transformadores.
- Limitaciones de tipo ambiental: Los requerimientos ambientales han llevado a que algunos de los nuevos proyectos de generación y transmisión no se puedan realizar al no obtener la licencia ambiental ó por los sobrecostos en estudios de impacto ambiental y planes de mitigamiento.
- Participación de capital privado: La construcción y operación de líneas de transmisión y plantas de generación por inversionistas privados exige la explotación intensa de estas facilidades para obtener la mejor tasa interna de retorno.

Esto requiere que en las líneas de transmisión se minimize la transmisión de potencia reactiva para disminuir las pérdidas y los generadores se deben operar con un alto factor de potencia, es decir generando muy pocos reactivos. En algunos países la participación de capital privado en el sector eléctrico es parte de la desregularización.

- Ambiente desregularizado: La desregularización del sector eléctrico (Ley 143 de 1994 en Colombia) introdujo una nueva forma de operar los sistemas de potencia donde los usuarios no regulados (Demanda máxima superior a 2 MW) pueden adquirir su energía a cualquier proveedor dentro o fuera del sistema al cual está conectado, en la llamada "Bolsa de energía".

El usuario debe pagar el transporte o "Peaje" para que su energía viaje a través de los sistemas de transmisión y distribución que existen entre el generador y su punto de conexión. Esto implica la importación de energía desde otros sistemas, aunque el sistema al cual está conectado el usuario tenga la disponibilidad para atender dicha demanda, y la transferencia de grandes flujos de potencia a través de los sistemas (Wheeling). Ver la figura 2.

Las limitaciones de tipo económico y ambiental y la desregularización del sector eléctrico presentan el mayor efecto sobre la posibilidad de que se presenten problemas de estabilidad de voltaje.

DEFINICIONES

Aunque se han publicado numerosos artículos sobre el tema de estabilidad de voltaje sorprende el hecho de que no existe una definición clara de lo que es estabilidad de voltaje y que no lo es. Por ejemplo, IEEE [1], define la estabilidad de voltaje como:

"La habilidad del sistema para mantener el voltaje así que cuando la admitancia de la carga es incrementada, la potencia de la carga se incrementará, y así ambos la potencia y el voltaje son controlables"

La inestabilidad de voltaje es definida por la misma referencia así [1]:

"Un sistema entra a un estado de inestabilidad de voltaje cuando una perturbación, incremento en la carga, ó cambio en el sistema causa que el voltaje caiga rápidamente ó sea llevado hacia abajo, y los operadores y sistemas de control fallan para detener la caída. La caída del voltaje podría tomar unos pocos segundos ó 10 a 20 minutos. Si el descenso en el voltaje continúa, ocurrirá inestabilidad angular de estado estable ó colapso de voltaje"

El Colapso de voltaje es definido por el IEEE [1] como:

"El proceso por el cual la inestabilidad de voltaje conduce a un muy bajo perfil de voltaje en una parte del sistema"

Por su parte, Harrison K. Clark [2] define la inestabilidad de voltaje como el evento donde:

"Los voltajes caen del valor normal a 90% o menos durante un período de varios minutos, con los operadores inhabilitados para detener esta caída"

El colapso de voltaje es definido por el mismo autor como el evento donde [2]:

"Los voltajes alcanzan alrededor de 85% y un motor se bloquea, llevando el voltaje más abajo y se inicia un bloqueo en cascada de otros motores"

La seguridad de voltaje es definida por el IEEE [1] como:

"La habilidad del sistema, no únicamente para operar estable, pero también para permanecer estable después de cualquier contingencia razonablemente creíble o un cambio adverso en el sistema"

VARIACIÓN DEL VOLTAJE CON LA POTENCIA

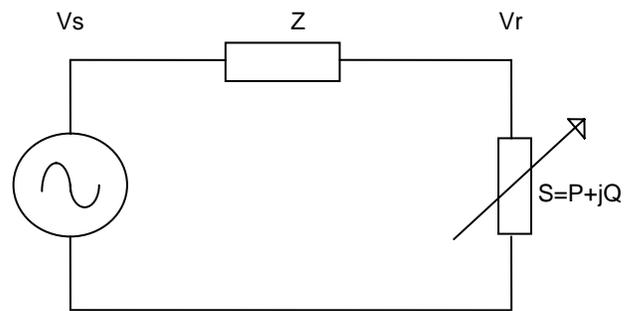


Figura 3. Circuito para estudiar la variación del voltaje con la potencia.

Para entender la disminución del voltaje que se produce al aplicar una carga y la inestabilidad que se puede presentar si dicha carga es excesiva analicemos el circuito de la figura 3, donde un generador conectado a una impedancia Z y con un voltaje interno constante V_s alimenta a una carga variable S. La ecuación general que describe el voltaje en la carga V_r es:

$$V_r \cdot V_r - V_r \cdot V_s + S \cdot Z = 0 \quad (1)$$

La ecuación (1) no puede ser dibujada en el plano porque V_r y S son números complejos. Si se asume un factor de potencia constante, se puede graficar $|V_r|$ versus $|S|$. La figura 4 muestra la gráfica de esta ecuación para el caso de carga reactiva e impedancia totalmente inductiva

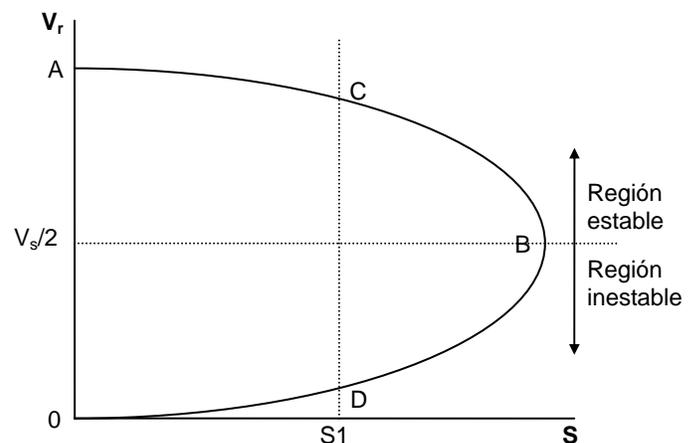


Figura 4. Curva $V_r - S$ para la estabilidad de voltaje de estado estable.

El punto B o "nariz" de la parábola depende del factor de potencia y, si existen cambios en la red, o sea en la impedancia Z, la curva cambiará, Por lo cual esta curva describe el sistema para una topología fija. En la gráfica $V_r - S$ de la figura 4 podemos identificar dos zonas:

- De A a B el voltaje V_r disminuye conforme aumenta la potencia S . El punto B representa la máxima carga que puede manejar la fuente. Para este punto el voltaje V_r es la mitad del voltaje V_s . Esta zona es considerada estable en voltaje y el punto B es el límite de estabilidad.
- De B a 0 se conoce como la zona de inestabilidad de estado estable.

Supóngase que se está operando el sistema en el punto S1. Cuando nos ubicamos en el punto C si la carga se incrementa se puede atender esta carga adicional sin ningún problema. La zona de C a B es la reserva del sistema. Si se opera el sistema en el punto D no podemos atender la carga adicional pues se requiere un aumento en el voltaje V_r , lo cual es imposible aunque matemáticamente exista solución.

MÉTODOS DE ANÁLISIS

La mayor parte de los métodos de análisis para estudiar la estabilidad de voltaje son estáticos en el tiempo. Sin embargo, la inestabilidad de voltaje y el colapso de voltaje son fenómenos completamente dinámicos manejados por las cargas. De igual forma, se puede hablar de inestabilidad únicamente cuando el sistema es dinámico.

Los primeros intentos de analizar el problema de estabilidad de voltaje estuvieron relacionados con la convergencia del flujo de carga. Si existe un desbalance en la potencia reactiva el flujo de carga no converge o presenta múltiples soluciones.

Después se desarrollaron los métodos de flujo de carga no divergente, flujo de carga óptimo, curvas V-Q, V-P, Q-V y P-V, indicadores de proximidad de colapso de voltaje (VCPI), análisis modal, método de energía y método estocástico. Todos estos métodos utilizan como base el flujo de carga.

Estos métodos son estáticos, pues determinan si existe posibilidad de inestabilidad de voltaje ó no para un punto de operación, pero no dicen nada acerca de la trayectoria que sigue el sistema hasta una condición de estabilización o de colapso.

En la década de los noventa aparecen los métodos dinámicos los cuales determinan la trayectoria que sigue el sistema cuando es sometido a una perturbación hasta un punto de estabilización o de colapso. La trayectoria puede ser alterada por las acción de los controles, las protecciones, las cargas y los operadores, abarcando períodos de hasta treinta minutos. Este análisis es completamente general y se

puede aplicar para pequeñas y grandes perturbaciones, lo cual no ocurre, por ejemplo, con el análisis modal.

El análisis en el tiempo se puede hacer de dos formas: Resolviendo directamente las ecuaciones diferenciales del sistema ó utilizando software de simulación. Es obvio que la segunda alternativa es la más conveniente. En ambos casos, el flujo de carga determina las condiciones iniciales. Se observa entonces, que el flujo de carga es irremplazable pues todos los métodos de análisis lo requieren.

A nivel de planeamiento, CIGRE [6] recomienda utilizar un criterio n-2 (Salida de dos elementos) en los estudios de estabilidad de voltaje, sin importar el método empleado.

MODELAMIENTO PARA ESTUDIOS DINÁMICOS

- Generadores: El modelo de voltaje interno constante no es válido.
- Sistema de excitación: Si no se considera excitación constante, se deben utilizar los modelos establecidos por IEEE [3].
- Transformadores: Se debe incluir el sistema de cambio de taps. Aunque las cargas sean estáticas, la acción de los cambiadores de taps hace que sean dinámicas. Los cambiadores automáticos de taps han sido responsables por gran parte de las inestabilidades y colapsos de voltaje.
- Cargas: La estabilidad de voltaje está manejada por la dinámica de las cargas por lo cual su modelamiento tiene gran impacto sobre los resultados. La carga que presenta mayor exigencia para la estabilidad de voltaje es la de potencia constante. Por el contrario, las cargas de impedancia constante no pueden sufrir un colapso de voltaje.
- Turbinas y reguladores de velocidad: Se puede incluir la dinámica de estos elementos, especialmente si existen grandes desbalances en la potencia activa.
- Sistemas de control de generación (AGC): Como la inestabilidad de voltaje se extiende por un periodo de minutos, se debe considerar la acción de estos dispositivos.

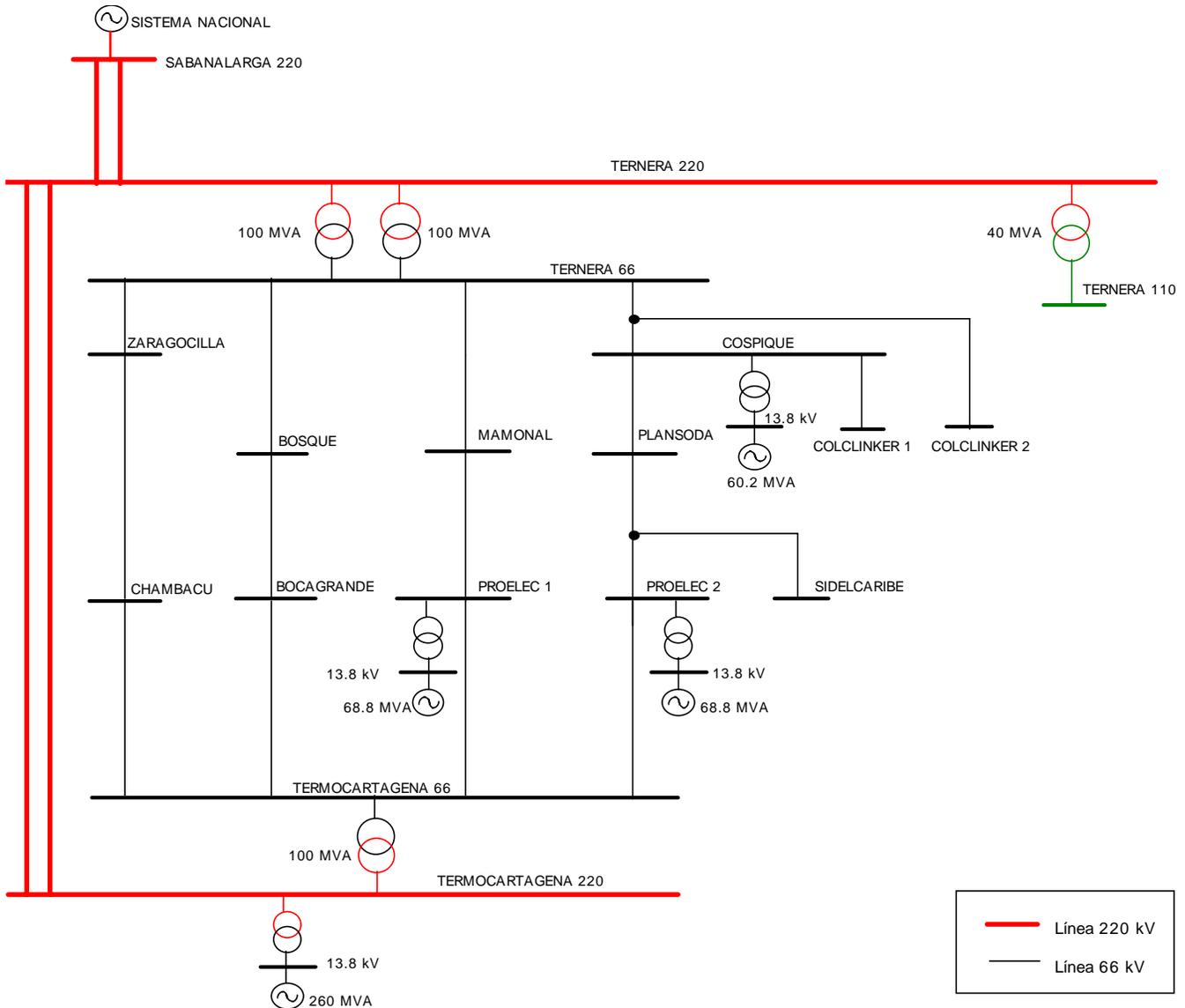


Figura 5. Diagrama unifilar general del sistema de la Electrificadora de Bolívar.

EJEMPLOS

En la referencia [10] se presenta un estudio de colapso de voltaje utilizando simulación en el dominio del tiempo, realizado en el sistema de la Electrificadora de Bolívar (1995). Para la simulación se utilizó el programa de estabilidad transitoria STAB de Consultoría Colombiana S. A. La figura 5 presenta el diagrama unifilar de este sistema.

El estudio mencionado tiene las siguientes características:

- Se estudia la estabilidad de voltaje transitoria por lo cual el tiempo de simulación se extiende entre cero y dos segundos. Esto se hace para determinar

eventos que producen una rápida caída del sistema sin que los controles y operarios alcancen a actuar.

- Para los generadores se utiliza el modelo detallado implementado en el programa STAB, el cual es de primer orden.
- Se incluye el sistema de excitación IEEE tipo 1.
- No se consideran sistemas turbina - regulador de velocidad.
- No se incluye la acción de sistemas automáticos de generación ni de centros de despacho regionales.

- Las cargas se modelan como potencia constante.
- Para las líneas de transmisión se utiliza el modelo PI debido a su poca longitud (Menos de 100 km.)
- Los sistemas de compensación de reactivos existentes ya están incluidos en las cargas.
- No se consideran cambios de taps en los transformadores.
- Se considera que existe inestabilidad de voltaje cuando la tensión en uno o varios nodos cae a valores menores o iguales a 0.9 por unidad y mayores a 0.85 por unidad y existe colapso de voltaje cuando la tensión en uno varios nodos del sistema cae a 0.85 o menos por unidad.
- Se consideran protecciones eléctricas de sobrecorriente y mínima tensión con tiempos de disparo menores a 0.5 segundos.
- Los ángulos de las máquinas sincrónicas están presentados respecto al nodo de referencia Termocartagena, el cual es la barra slack para el flujo de carga.
- La carga total del sistema es de 270.61 MW y 141.61 MVAR. El despacho está dado así: Termocartagena (100 MW, 60 MVAR), Proeléctrica 1 y 2 (45 MW, 10 MVAR), Cospique (20 MW, 10 MVAR) y sistema externo (70 MW, 50 MVAR).
- Las cargas de las barras Ternera, Bocagrande, Bosque, Chambacú y Zaragoza es de 163.3 MW y 95.9 MVAR lo cual representa 60% y 68% de las potencias activa y reactiva del sistema, respectivamente.
- En todos los casos se estudia el sistema bajo la condición de una demanda de reactivos anormal y luego se produce la salida de una línea debido a una falla o una falla trifásica. Esta falla no está necesariamente relacionada con el aumento anormal en la carga reactiva, simplemente ocurre bajo esta condición.
- El aumento anormal de la demanda reactiva se considera así: 50% en las barras Bocagrande, Bosque, Zaragoza y Chambacú y del 20% en Ternera 66 (Zona residencial). Esto significa un aumento de 34.93 MVAR o sea un 25% de aumento con respecto a la carga reactiva normal. Es anotar que esta condición se puede presentar fácilmente en una ciudad costera y turística como la considerada en una época de intenso verano.

Es de anotar que en un estudio dinámico como éste es necesario ejecutar corridas de programa para cada uno de los posibles eventos que pueden presentarse en el sistema. Para el sistema de prueba implementado se deben estudiar sesenta eventos.

CASO 1. DESCONEXION DEL SISTEMA EXTERNO

Se estudia el sistema bajo la condición de máxima demanda reactiva y luego, debido a una falla, se produce la desconexión parcial al sistema externo.

La siguiente es la secuencia de eventos:

- En $t=0.0$ segundos se produce un aumento en la carga reactiva residencial del 25%.
- Los voltajes en algunos generadores empiezan a descender hasta 0.9, o sea hay inestabilidad de voltaje.
- Las líneas a 220 kV Sabanalarga-Ternera suministran la potencia adicional requerida por el sistema de aproximadamente 150 MVA.
- Se considera que una de estas líneas se sobrecarga o sale, debido a una falla, en $t=0.6$ segundos.
- Al salir la línea, los voltajes se deterioran más y se produce el colapso de voltaje.
- El segundo circuito de la línea se sobrecarga y sale en $t=1.0$ segundos. Sin embargo el sistema ya ha colapsado.

Las figuras 6 a 10 muestran los voltajes en las barras de generación, voltaje promedio del sistema, potencia activa, potencia reactiva y diferencia angular. De este caso se observa lo siguiente:

- Una falla en las líneas de 220 kV Sabanalarga-Ternera durante un período de máxima demanda reactiva en la zona residencial puede producir el colapso del sistema.
- No se produce inestabilidad angular.
- El sistema considerado se desconecta del sistema externo.
- Debido a las condiciones de despacho implantadas, el sistema no es capaz de responder a esta emergencia.

CASO 2: DESCONEXION INTERNA A 220 kV

Este caso es similar al anterior pero en se produce la salida de uno de los circuitos a 220 kV Ternera-Termocartagena. La secuencia de eventos es:

- En $t=0.0$ segundos se produce un aumento en la carga reactiva residencial del 25%.
- Los voltajes en algunos generadores empiezan a descender hasta 0.9, o sea hay inestabilidad de voltaje.
- En $t=0.6$ segundos se produce la salida de uno de los circuitos de la línea Ternera - Termocartagena 220 kV.
- Al salir la línea los voltajes se deterioran más y se produce inestabilidad de voltaje.
- El segundo circuito de la línea se sobrecarga y sale en $t=1.0$ segundos. El sistema sigue presentado inestabilidad de voltaje pero no hay colapso.
- En $t=1.5$ se produce la salida de uno de los circuitos a 220 kV Sabanalarga - Ternera debido a sobrecarga. El sistema colapsa.
- En $t=1.8$ se produce la salida del segundo circuito Sabanalarga - Ternera, pero el sistema ya ha colapsado.

Las figuras 11 a 15 muestran los voltajes en las barras de generación, voltaje promedio del sistema, potencia activa, potencia reactiva y diferencia angular.

De este caso se puede concluir lo siguiente:

- Una falla en las líneas de 220 kV Ternera-Termocartagena durante un período de máxima demanda reactiva en la zona residencial produce colapso de voltaje.
- No se produce inestabilidad angular.
- El sistema considerado se desconecta del sistema externo.
- El colapso de voltaje tarda más tiempo en presentarse en este caso que en el anterior.

CASO 3: FALLA INTERNA A 66 kV

En este caso se estudia el efecto de una falla trifásica en el nodo de derivación a Sidelcaribe, sobre la estabilidad de voltaje y la estabilidad angular. La secuencia de eventos es:

- En $t=0.0$ segundos se produce un aumento en la carga reactiva residencial del 25%.
- Los voltajes en algunos generadores empiezan a descender hasta 0.9, o sea hay inestabilidad de voltaje.
- En $t=0.6$ segundos se produce cortocircuito trifásico en el nodo de derivación a Sidelcaribe. El sistema presenta colapso de voltaje e inestabilidad angular.
- En $t=0.9$ segundos se aclara la falla, abriendo la línea Planta de Soda - Proeléctrica 2.
- A pesar del aclaramiento de la falla el sistema no se recupera.
- Las plantas Proeléctrica 1 y 2 pierden estabilidad angular y de voltaje simultáneamente.
- La planta Cospique también colapsa en voltaje.
- La única planta que sostiene al sistema bajo la condición de inestabilidad es Termocartagena.
- Es difícil en este caso que ocurre primero si estabilidad angular o estabilidad de voltaje ya que ambas se presentan al tiempo.

Las figuras 16 a 20 nos muestran los voltajes en las barras de generación, voltaje promedio del sistema, potencia activa, potencia reactiva y diferencia angular.

De este caso se puede concluir lo siguiente :

- El sistema es muy sensible a grandes fallas en la zona industrial en cuanto a estabilidad angular y a estabilidad de voltaje.
- Una falla en el sistema interno produce perturbaciones que se transmiten hasta el sistema externo. En la barra Sabanalarga esto se manifiesta como oscilaciones de voltaje y de potencia.
- El sistema considerado no se desconecta del sistema externo para esta falla.

MEDIDAS REMEDIALES

- Operar los generadores no económicos entregando reactivos.
- Compensación serie. Esto acorta la longitud de la línea y permite transportar más potencia. Es una excelente solución pero pueden producirse otros problemas como resonancia subsíncrona.
- Compensación paralelo. Para corregir el factor de potencia localmente. Sin embargo, la producción de reactivos se disminuye conforme el voltaje desciende.
- Compensación de reactivos estáticos (SVS ó SVC). Son muy efectivos para controlar el voltaje y prevenir los colapsos de voltaje pues son elementos dinámicos.
- Compensación con generadores sincrónicos. Es una alternativa muy buena pero demasiado costosa. Los generadores antiguos o fuera de servicio se pueden convertir en condensadores.
- Operación a altos voltajes ($0.95 < |V| < 1.1$ p.u). Esto disminuye la demanda reactiva pero puede agotar las reservas de reactivos del sistema. Sin embargo, operar a altos voltajes no garantiza la estabilidad de voltaje.
- Deslastre de carga por voltaje. Esta es una medida muy efectiva para prevenir los colapsos de voltaje.
- Generadores con bajo factor de potencia. Donde la generación está cercana a la carga se pueden utilizar generadores con factores de potencia nominales de 0.80 ó 0.85. Sin embargo, esta medida no es atractiva para un generador privado.
- Sobrecarga de generadores. Los generadores se pueden sobrecargar en su capacidad de reactivos y así controlar el voltaje durante períodos críticos.
- Bloqueo de cambiadores automáticos de taps en transformadores. Lo cual previene el aumento de la demanda reactiva cuando se presenta inestabilidad de voltaje.
- Entrenamiento de los operadores. Los operadores se deben capacitar sobre la forma en que se presentan los colapsos de voltaje para que durante estas perturbaciones tomen acciones de control que ayuden a recuperar el sistema. Esto debe permitir identificar que es un problema de estabilidad de voltaje y que no lo es.

- Compensación por generación de reactivos. En un ambiente desregularizado se deben despachar algunas máquinas con bajo factor de potencia para garantizar la estabilidad de voltaje y prevenir los colapsos ante una falla. Los usuarios (cargas) y los generadores despachados con alto factor de potencia deben pagar por este soporte (seguridad) de reactivos

CONCLUSIONES

- Las limitaciones de tipo económico y ambiental y especialmente la desregularización imponen nuevas condiciones para el planeamiento y la operación de los sistemas de potencia, añadiendo una nueva restricción a tenerse en cuenta: La estabilidad de voltaje.
- La estabilidad de voltaje debe incorporarse en el planeamiento de los sistemas de potencia para determinar la posibilidad de problemas de este tipo y su impacto sobre la seguridad, confiabilidad y calidad del servicio.
- En la operación de los sistemas de potencia se deben establecer nuevas estrategias que tengan en cuenta los eventos que se suceden cuando se presenta inestabilidad de voltaje. Estas estrategias deben considerar los controles y protecciones eléctricas instalados en el sistema.
- Al realizar despachos locales y nacionales en un ambiente desregularizado se debe verificar que las transacciones solicitadas por los usuarios no comprometan la seguridad del sistema por la potencialidad de problemas de estabilidad de voltaje.
- Las empresas del sector eléctrico deben adelantar estudios de estabilidad de voltaje para determinar la potencialidad de problemas de inestabilidades y colapsos de voltaje en sus sistemas y establecer las correspondientes medidas correctivas.
- La mejor herramienta que existe para el estudio de inestabilidades y colapsos de voltaje es la simulación en el tiempo pues permite analizar el efecto de las estrategias de operación, control y protección en el comportamiento del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEEE, "Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools and Industry Experience", IEEE Publication 90TH0358-2-PWR, 1990. (Libro).
- [2] Clark H. K, "The Voltage Collapse Phenomenon", Minnesota Power Systems Conference, October 1-3, 1991.
- [3] IEEE Working Group, "Excitation System Models for Power System Stability Studies", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 100, No. 2, 1981.
- [4] Consultoría Colombiana S. A, "Análisis de Estabilidad Transitoria", documento del Estudio del Sistema Eléctrico de la Electrificadora de Bolívar, 1995.
- [5] IEEE, "Reactive Power: Basics, Problems and Solutions", IEEE Tutorial Course - Course Text 87EH0262-6-PWR, 1987. (Libro).
- [6] CIGRE, "Planning Against Voltage Collapse", documento SC 38-01 TF 03, 1986.
- [7] Gupta R. K, Alywan Z. A, Stuart R. B, Reece T. A, "Steady State Voltage Instability Operations Perspective", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4, 1990.
- [8] Pal M. K, "Voltage Stability Considering Load Characteristics", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, 1992.
- [9] Taylor C. W, "Power System Voltage Stability", McGraw-Hill, 1994. (Libro).
- [10] Zapata C. J, "Estudio de Colapso de Voltaje Utilizando Simulación en el Dominio del Tiempo", Tesis de Magister, Universidad de los Andes, 1996.
- [11] Consultoría Colombiana S. A, "Manual del Usuario - Programa de Estabilidad Transitoria", 1988.
- [12] IEEE, "System Protection and Voltage Stability", documento 93TH0 596-7 PWR, 1993.

BIOGRAFÍA

CARLOS J. ZAPATA. Recibió el título de Ingeniero Electricista de la Universidad Tecnológica de Pereira en 1991 y de Magister en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de los Andes en 1996. Desde 1991 se encuentra vinculado a Consultoría Colombiana S. A. donde se desempeña como Ingeniero de Diseño y ha participado en diseños, estudios de sistemas eléctricos y desarrollo de software. El señor Zapata es miembro de IEEE.