

SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA II

Ing. Ramón Sandoval

ESTABILIDAD DE TENSION

RESUMEN

El **colapso de tensión** es uno de los problemas de estabilidad de los S.E.P que ha adquirido gran importancia en los últimos años debido a sus potenciales consecuencias, tal como se ha evidenciado en los últimos apagones de grandes S.E.P modernos, poniendo en primer plano de actualidad los problemas de estabilidad de tensión. Se toma como medida de la estabilidad de tensión la distancia que tienen las ecuaciones de flujo de potencia a la bifurcación silla (SNB), medida que también se conoce como margen de carga; se puede determinar dicho margen del sistema por medio del programa PSAT que hace uso del método de continuación. Se emplea el análisis modal para determinar las barras donde se ha de botar carga.

INTRODUCCION

La creciente demanda de los mercados eléctricos ha llevado a los sistemas de potencia a operar cada vez más cerca de sus límites de capacidad de carga máxima, con lo cual han surgido nuevas problemáticas, entre ellas el problema de la estabilidad de tensión que ha constituido en los últimos años un tema de fuerte preocupación y de especial interés, debido a la importancia de este fenómeno en la seguridad dinámica de los S.E.P.

Generalmente los problemas de **estabilidad de tensión** se manifiestan como una caída progresiva e incontrolable del nivel de tensión en las barras del sistema como resultado del intento de las cargas en recuperar su consumo de potencia después de ocurrida una contingencia, o en sistemas fuertemente cargados, cuando la demanda de la carga aumenta. Así, básicamente el problema consiste en mantener la tensión de la red en niveles que garanticen una operación estable, lo cual se ha hecho un poco difícil en los últimos años debido a que algunos factores han contribuido a acrecentar este problema, tales como el uso desmedido de la compensación reactiva, la gran complejidad de los sistemas interconectados y el cambio estructural del sector eléctrico hacia mercados de libre acceso donde las empresas del sector se ven incentivadas económicamente a operar los S.E.P. a su capacidad máxima evadiendo así los costos de construir nuevas líneas y centrales eléctricas.

INTRODUCCION

Bajo estas condiciones la estabilidad de tensión actualmente ha pasado a ser uno de los temas de más interés en la evaluación de la seguridad dinámica de los sistemas de potencia, inclusive, los problemas de estabilidad de tensión recientemente han destacado como la limitante principal para un numero de sistemas, cada vez mayor, igualando incluso a la estabilidad angular como la restricción principal de los sistemas de potencia. Se hace entonces necesario predecir bajo ciertas condiciones, posibles escenarios de inestabilidad a fin de tomar las acciones preventivas y/o correctivas para evitar que las tensiones colapsen y mejorar la estabilidad de tensión.

Ante las potenciales consecuencias de un **colapso de tensión**, existen algunas posibles soluciones que permiten recuperar la estabilidad de tensión o mejorar el margen de carga, entre ellas se tienen, el redespacho de generación, la compensación de potencia reactiva, el control secundario de tensión, reforzamiento del sistema de potencia (Líneas en paralelo) y el bote de carga.

Panorama

Debido a que la demanda de energía eléctrica siempre esta en constante crecimiento, los sistemas eléctricos de potencia **tienden a estar cada vez más cargados**, ya que la construcción de nuevos sistemas transmisión-generación que compensen tal crecimiento es limitada. Como consecuencia se han venido observando a través de los años de explotación de varios sistemas alrededor del mundo serios problemas de estabilidad que nunca antes se habían visto, donde estos problemas en su **mayoría se caracterizaban por una caída de las magnitudes de las tensiones de varios minutos de duración**, que en muchos casos resultaron en colapsos completos del sistema, este problema es conocido como **inestabilidad de tensión**, de manera que es correcto hablar también en términos de estabilidad de tensión.

La **estabilidad de tensión** en la actualidad se ha convertido en uno de los problemas más importantes en los sistemas eléctricos de potencia, como ya se dijo, debido al uso intensivo de los sistemas de transmisión-generación. La estabilidad de tensión se relaciona con la capacidad de un sistema para mantener aceptables todas las tensiones de barras bajo condiciones normales y después de ser sometido a una perturbación. Por otro lado, la inestabilidad de tensión se manifiesta como una caída progresiva e incontrolable de la tensión en la carga, que en ocasiones pudiera resultar en un colapso de las tensiones y la interrupción del servicio eléctrico, dejando como consecuencias pérdidas económicas en los sectores industriales e incomodidad y molestia en los sectores residencial y comercial.

Estabilidad de tensión (definición)

La estabilidad de tensión es la habilidad de un sistema eléctrico de potencia de mantener las tensiones estacionarias aceptables en todas las barras del sistema bajo condiciones normales de operación y después de haber sido sometido a una perturbación.

En la literatura pueden encontrarse varias definiciones de lo que significa estabilidad o inestabilidad de tensión, entre ellas tenemos: **“Es la habilidad de un sistema de potencia para mantener un nivel de tensión aceptable en todas las barras del sistema bajo condiciones normales y después de ser sometido a una perturbación”**. Otra definición es: **“La capacidad de un sistema de potencia de alcanzar niveles de tensión fijos, mayores que cero, en todos sus nodos o barras después de haber sufrido cualquier perturbación”**. Según esta última definición, se pueden tener sistemas con niveles permanentes de tensiones “bajos”, aunque no sean adecuados según el operador, pero aun así son catalogados como estables, lo cual está de acuerdo con definiciones de estabilidad en sistemas no lineales, donde un sistema se considera estable si alcanza un punto de equilibrio, o punto de operación fijo, después de haber sido perturbado; en la práctica se han observado sistemas de potencia estables con niveles “inadecuadamente” bajos de tensión. Sin embargo, sistemas eléctricos de potencia con niveles permanentes de tensión bajos, aunque sean estables, no son necesariamente convenientes, debido a los problemas que las tensiones bajas pueden causar especialmente en cargas, como es el caso de sobrecorrientes en motores de inducción. Obsérvese también que en esta última definición las perturbaciones pueden ser de cualquier tipo: “grandes”, como en el caso de pérdidas de líneas de transmisión, transformadores y/o unidades de generación, o “pequeñas”, como en el caso de incrementos graduales de carga. Por otro lado, la inestabilidad de tensión se define como: “El resultado del intento de las cargas dinámicas para recuperar el consumo de potencia más allá de la capacidad combinada del sistema de generación y transmisión”. Según esta definición un sistema ingresa a un estado de inestabilidad de tensión cuando una perturbación, un incremento en la demanda de la carga, o un cambio en la condición de operación o topología del sistema, provoca una progresiva e incontrolable caída de tensión.

Estabilidad de tensión (definición)

El factor principal causante de **la inestabilidad de tensión** es la incapacidad del S.E.P. de satisfacer la demanda de potencia reactiva. El centro del problema es usualmente la caída de tensión que ocurre cuando la potencia activa y reactiva fluyen a través de la reactancia inductiva asociada con el sistema. Aparte, la inestabilidad de tensión es un problema local, sin embargo puede resultar en un colapso de las tensiones de la red, lo que puede llevar a una pérdida parcial o total del sistema, dependiendo de las acciones de los dispositivos de protección del sistema y también del operador.

Un criterio práctico de estabilidad de tensión es que para una condición de operación dada, la magnitud de la tensión de una barra debe incrementarse cuando se inyecta potencia reactiva en esta barra. En tal sentido, un sistema tiene inestabilidad de tensión si, para al menos una barra del sistema la tensión disminuye cuando la inyección de potencia reactiva en la misma barra aumenta.

En la actualidad, se reconoce el problema de inestabilidad de tensión como la mayor amenaza para la seguridad dinámica de un S.E.P. al menos tan importante como los problemas de inestabilidad de ángulo, conocidos desde hace tiempo. Los principales factores que han contribuido a este problema son:

- Incremento de la demanda de la carga.
- Limitaciones en cuanto a la construcción de nuevos sistemas de transmisión-generación, debido a los altos costos del terreno y leyes para la protección del medio ambiente
- Ubicación de grandes centros de generación en lugares distantes de los principales centros de carga.
- Niveles bajos de tensión en generación de las centrales.
- La gran complejidad de los sistemas de energía interconectados.
- Insuficiencia de compensación reactiva en al carga.
- Pérdida de banco de condensadores.

Estabilidad de tensión (definición)

La inestabilidad de tensión es causada generalmente por una perturbación o un cambio en las condiciones de operación, lo cual crea un aumento en la demanda de la potencia reactiva. Este incremento en la demanda de la potencia eléctrica hace que el sistema de potencia trabaje cerca de sus límites, que se caracteriza por una alta corriente, un bajo nivel de tensión y relativamente alto ángulo de potencia. Tal situación puede causar la pérdida de la estabilidad del sistema, el asilamiento o el colapso de la tensión.

Es interesante acotar que los sistemas que presentan problemas de estabilidad angular, es decir, una pérdida de sincronismo entre los diversos generadores de la red, también resultan eventualmente en problemas de estabilidad de tensión y, viceversa, sistemas que presentan un colapso de tensión llevan eventualmente a una separación angular de sus generadores. En el caso de problemas de estabilidad de tensión, el colapso de tensión ocurre “antes” que la separación de ángulos, y lo opuesto sucede en el caso de problemas de estabilidad de ángulos. Las razones para estos dos problemas de estabilidad son completamente distintas, ya que inestabilidades de tensión se deben principalmente a la ausencia total de un punto de equilibrio después de la perturbación, mientras que las inestabilidades de ángulo se deben fundamentalmente a la ausencia de un par de sincronismo entre diversos generadores.

Por último, la estabilidad de tensión es un fenómeno dinámico y no lineal, por lo tanto, su análisis requiere el uso de programas de computación para resolver un conjunto complejo de ecuaciones algebraicas-diferenciales, continuas y discretas que modelan al sistema de potencia. Además, requiere de herramientas matemáticas de la teoría de sistemas no lineales.

Métodos de análisis de estabilidad de tensión

Las herramientas y técnicas disponibles para el estudio de la estabilidad de tensión pueden dividirse en dos grandes grupos: dinámicas y estáticas. A partir de estos dos métodos de análisis se han propuesto muchas técnicas en la literatura para la evaluación y predicción de la estabilidad de tensión. Algunas de estas técnicas son la simulación dinámica en el dominio del tiempo, simulación en estado estático, curvas P-V, curvas V-Q, análisis modal, valor mínimo singular, análisis de bifurcaciones y método continuado, entre otros.

El método o enfoque dinámico por medio de simulaciones en el tiempo, el cual incluye la modelación detallada del sistema, sigue siendo el método de análisis que reproduce con mayor exactitud el comportamiento dinámico de la inestabilidad de tensión. Las simulaciones en el tiempo capturan los eventos y su cronología que conduce a la inestabilidad de tensión, proporcionando una clara visión del fenómeno y un mejor entendimiento de los requerimientos de la modelación. Sin embargo, este método consume mucho tiempo de cálculo y requiere de un mayor esfuerzo para el análisis de los resultados. Además, no se proporciona información directa sobre el grado de estabilidad del sistema.

Métodos de análisis de estabilidad de tensión

El análisis dinámico conlleva al uso de ecuaciones diferenciales no lineales y ecuaciones algebraicas en el modelado del sistema, que puede incluir las dinámicas de OEL (Limitador de sobreexcitación), motores de inducción, ULTC (Transformador con cambiador de tomas bajo carga), etc., a través de programas de estabilidad transitoria.

El análisis estático, por otra parte, depende principalmente del modelado del sistema en estado estacionario, como el modelo de flujo de potencia o modelo dinámico del sistema linealizado alrededor de un punto de operación dado. Por lo tanto, las ecuaciones del sistema se reducen solamente a ecuaciones algebraicas

Métodos de análisis de estabilidad de tensión

Actualmente existen muchas empresas de energía eléctrica que dependen de programas de flujo de potencia convencional para el análisis estático de la estabilidad de tensión. La estabilidad es determinada entonces, mediante el cálculo de las curvas **P-V** y **V-Q** en las barras de carga, previamente seleccionadas. Generalmente tales curvas se generan llevando a cabo una serie de cálculos de flujo de potencia usando modelos convencionales para los componentes del sistema y pequeños cambios en los parámetros de la carga, en cada barra y en forma independiente. Pueden dividirse los métodos de análisis estático de la siguiente forma:

- **Métodos basados en flujo de potencia los cuales dependen de la existencia de un perfil de tensión aceptable en la red. Este enfoque se relaciona con la máxima capacidad de transferencia de potencia de la red o de la existencia de una solución de flujo de potencia**
- **Métodos de estabilidad en estado estacionario los cuales prueban la existencia de un punto de equilibrio estable del sistema de potencia**

Veamos cada uno de ellos.

Métodos de análisis de estabilidad de tensión

Métodos basados en flujo de potencia los cuales dependen de la existencia de un perfil de tensión aceptable en la red. Este enfoque se relaciona con la máxima capacidad de transferencia de potencia de la red o de la existencia de una solución de flujo de potencia. Hay varios criterios bajo este enfoque. Algunos de estos criterios son los siguientes:

- Límite máximo de potencia transmitida (Curva P-V).
- Capacidad de potencia reactiva (Curva V-Q).
- Índice de proximidad a la inestabilidad de tensión (λ).

Métodos de análisis de estabilidad de tensión

Métodos de estabilidad en estado estacionario los cuales prueban la existencia de un punto de equilibrio estable del sistema de potencia. Algunos de los criterios propuestos bajo este enfoque son:

- Autovalores o ecuaciones dinámicas linealizadas.
- Valor singular o matriz Jacobiana.
- Matrices de sensibilidad.

Finalmente, el análisis de estabilidad de tensión requiere del estudio de un amplio rango de condiciones del sistema y un gran número de contingencias. Por lo tanto, el enfoque en estado estacionario del sistema es el más atractivo.

Métodos de análisis Estático

Las técnicas en estado estable empleadas para llevar a cabo estudios de estabilidad de tensión se basan en la formulación de flujos de potencia. Generalmente, mediante el uso de estas técnicas se obtiene importante información relacionada con la estabilidad de tensión de un sistema. Con base en esta información se sabe si el sistema muestra una estabilidad de tensión para una condición específica de operación dada; si el sistema es estable se puede saber que tan cerca está el sistema de la inestabilidad de tensión y, si el sistema es inestable, es posible observar donde y porque ocurre la inestabilidad de tensión. Es decir, el análisis estático proporciona respuestas referentes a dos importantes aspectos como son: el margen de estabilidad de tensión y el mecanismo de la inestabilidad de tensión. De hecho, los métodos de análisis de estabilidad de tensión son agrupados bajo dos enfoques bien diferenciados pero que suelen utilizarse en forma complementaria, estos son:

- **Proximidad a la inestabilidad de tensión:** En este enfoque los métodos de análisis tratan de determinar, ¿Qué tan cerca está el sistema a la inestabilidad de tensión?. Para ello se utilizan cantidades físicas tales como: **nivel de carga, flujo de potencia activa y reserva de potencia reactiva para medir el margen de estabilidad (distancia a la inestabilidad)**. Muy conveniente para evaluar la seguridad de la tensión.

Métodos de análisis Estático

- **Mecanismo de inestabilidad de tensión:** En este enfoque los métodos de análisis responden a preguntas tales como: ¿Cuándo, cómo y porqué ocurre la inestabilidad de tensión? y ¿Cuáles son los factores claves que contribuyen a la inestabilidad?. Los métodos de análisis que se agrupan bajo este enfoque son utilizados para suministrar información sobre las barras débiles del sistema, áreas involucradas en el colapso y que generadores y/o líneas que participan en el colapso, son de interés. Muy convenientes para el diseño de planes de operación y acciones preventivas o correctivas que pueden ser implementadas para evitar el colapso de la tensión y mejorar su estabilidad.

Métodos de análisis Estático

Para determinar el ***margen de estabilidad de tensión***, el sistema es forzado gradualmente hasta el punto en que ocurre la inestabilidad de tensión. Las condiciones del sistema en distintos niveles de carga y de esfuerzo, son obtenidas mediante la solución de las ecuaciones de flujos de potencia. La estabilidad de tensión de un sistema para una condición de operación dada, así como el mecanismo de la inestabilidad de tensión en caso de que esta exista, son determinados utilizando técnicas de análisis lineal.

Los procedimientos en estado estable también conocidos como **estáticos**, capturan condiciones instantáneas (fotografías) de un sistema en distintos puntos a lo largo de una trayectoria en el dominio del tiempo. En cada uno de esos marcos de tiempo, las derivadas de las variables de estado que representan a una simulación dinámica son asumidas igual a cero y de esta forma, las variables de estado toman los valores apropiados para el marco de tiempo específico. De este modo, el sistema completo de ecuaciones se reduce a un sistema con ecuaciones puramente algebraicas permitiendo con esto, el uso de las técnicas estáticas de análisis.

Métodos de análisis Estático

Las compañías de suministro de energía eléctrica llevan a cabo análisis estático de estabilidad de tensión mediante el cálculo de las curvas **P-V** y **V-Q** en nodos de carga previamente seleccionados. Aunque los procedimientos de generación de curvas pueden ser automatizados, estos consumen demasiado tiempo de cómputo y no proporcionan una rápida información que puede ser útil para conocer de una forma más certera, las causas que originan los problemas de estabilidad de tensión. Otra desventaja es que estos procedimientos se enfocan sobre nodos individuales, es decir, las características de la estabilidad son establecidas sometiendo a condiciones de esfuerzo a cada nodo de forma independiente.

Existe el inconveniente en algunos casos, de que no es posible generar completamente este tipo de curvas, principalmente las **P-V**, debido a problemas de divergencia en la solución de flujos de potencia ocasionados por problemas en algún punto del sistema eléctrico

Curvas P-V

Las curvas P-V o curva potencia activa-tensión, es el método usado mayormente para predecir la seguridad de la tensión. Se utilizan para determinar el límite de estabilidad de tensión en estado estacionario de un sistema de potencia, a partir de la distancia en MW desde el punto de operación al punto de tensión crítica. En la **Figura 1** se muestra una típica curva P-V. Se puede considerar que la curva mostrada se obtiene para un sistema elemental carga-línea-barra infinita, donde P , es la potencia activa de la carga, y se toma como un parámetro que varía lentamente, y V es la tensión en la barra de la carga. En la figura también se puede observar que existen dos regiones para P . En la primera región, el flujo de potencia tiene dos soluciones diferentes para cada valor de P ; una es la tensión estable deseada y la otra es la tensión inestable. Al incrementar gradualmente a P , el sistema entra a la segunda región, donde las dos soluciones se interceptan para formar una sola solución para P , que es la máxima. Si P aumenta más allá de ese valor, las ecuaciones de flujo de potencia fallan para dar una solución. Este proceso es visto como una bifurcación del problema de flujo de potencia. Más adelante se verá este tipo de bifurcación.

Curvas P-V

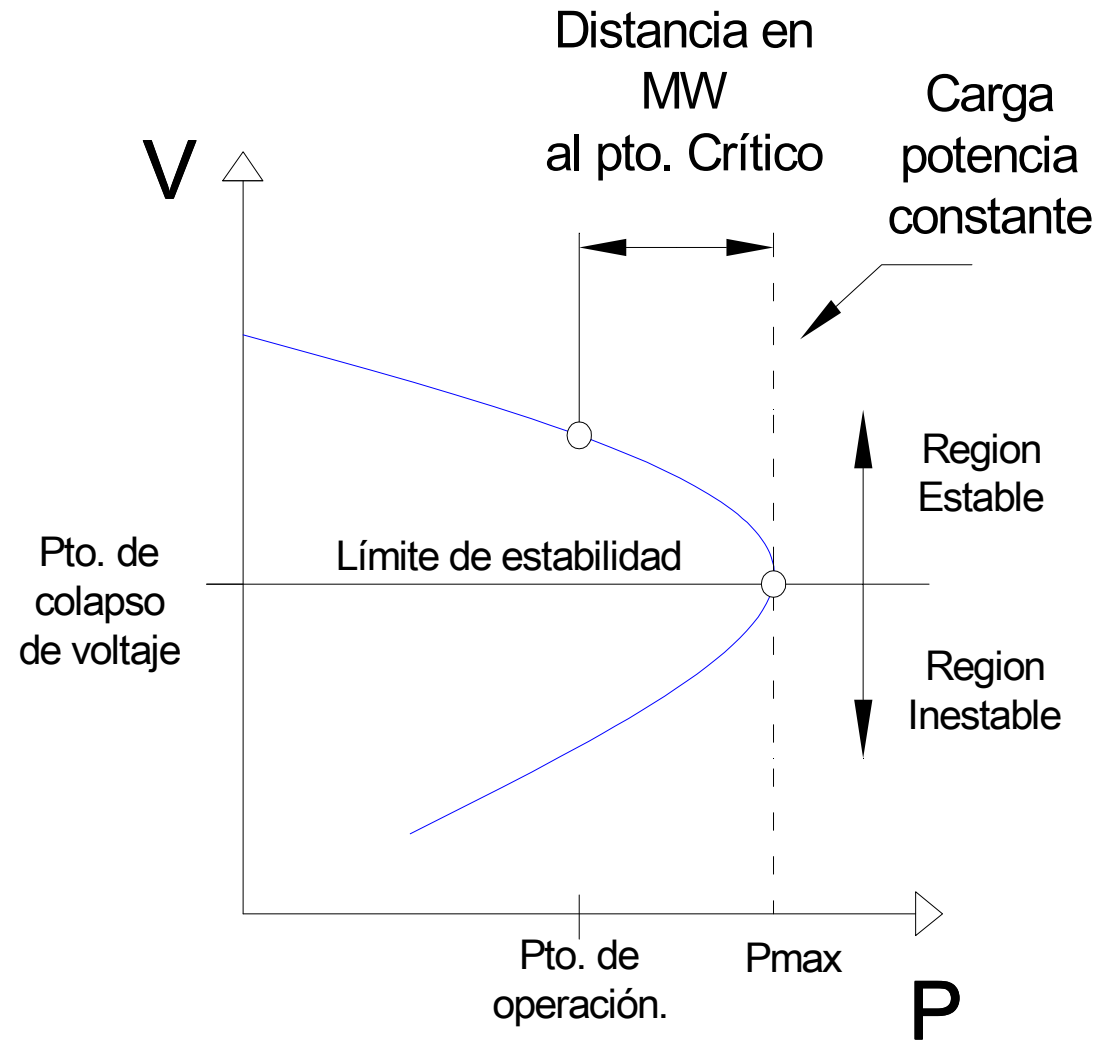


Figura 1. curva P-V típica para FP constante

Curvas P-V

Los sistemas de potencia, **son operados en la parte superior de la curva**, donde es estáticamente y dinámicamente estable. La punta de la curva (también conocida como **nariz de la curva**) es llamada el punto de máxima carga. El punto crítico donde las soluciones se unen se llama punto de colapso de tensión. El punto de máxima potencia es de mayor interés desde el punto de vista práctico que el colapso de tensión, debido a que la máxima carga del sistema de potencia se alcanza en este punto. El punto de máxima carga es el punto de colapso de tensión cuando se consideran cargas de potencia constante, pero en general ellos son diferentes. La dependencia de la carga con la tensión afecta el punto de colapso de la tensión. *El sistema de potencia es de tensión inestable en el punto de colapso de tensión.*

Bifurcación silla nodo (SNB)

Los sistemas de potencia se modelan por medio de ecuaciones diferenciales-algebraicas, y presentan cambios de estabilidad cuando ciertos parámetros del sistema varían, como cualquier otro sistema no lineal.

El estudio de los cambios en la inestabilidad con respecto a la variación de uno o varios parámetros del sistema se hace a través de la **teoría de bifurcación**. Una parte de esta teoría se concentra en el estudio de los cambios de estabilidad en los puntos de equilibrio cuando ciertos parámetros, llamados parámetros de bifurcación, varían lentamente. Así, a los puntos de equilibrio donde la estabilidad de estos equilibrios cambia significativamente, por ejemplo de estable a inestable, se conocen como puntos de “bifurcación”. Esto es importante desde el punto de vista práctico en sistemas de potencia eléctrica, ya que se ha observado que ciertos problemas de estabilidad se pueden analizar a través del estudio de los puntos de bifurcación del sistema con respecto a variaciones de algunos parámetros en el sistema, en particular la carga. Por ejemplo, el problema de colapso de tensión se puede asociar directamente con la bifurcación del nodo de ensilladura o SNB (***Saddle Node-Bifurcation***) por sus siglas en inglés.

Ver figura 2

Bifurcación silla nodo (SNB)

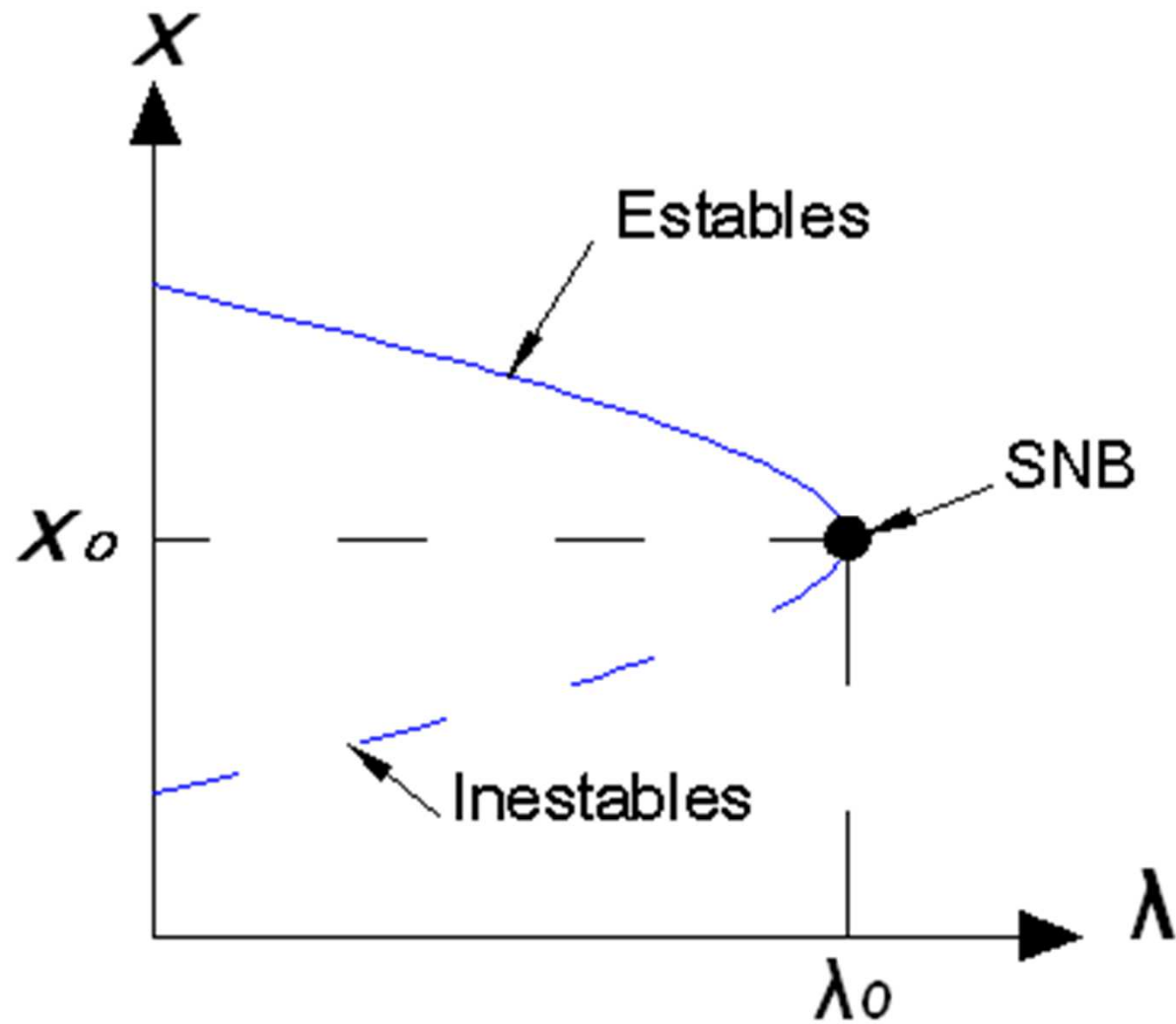
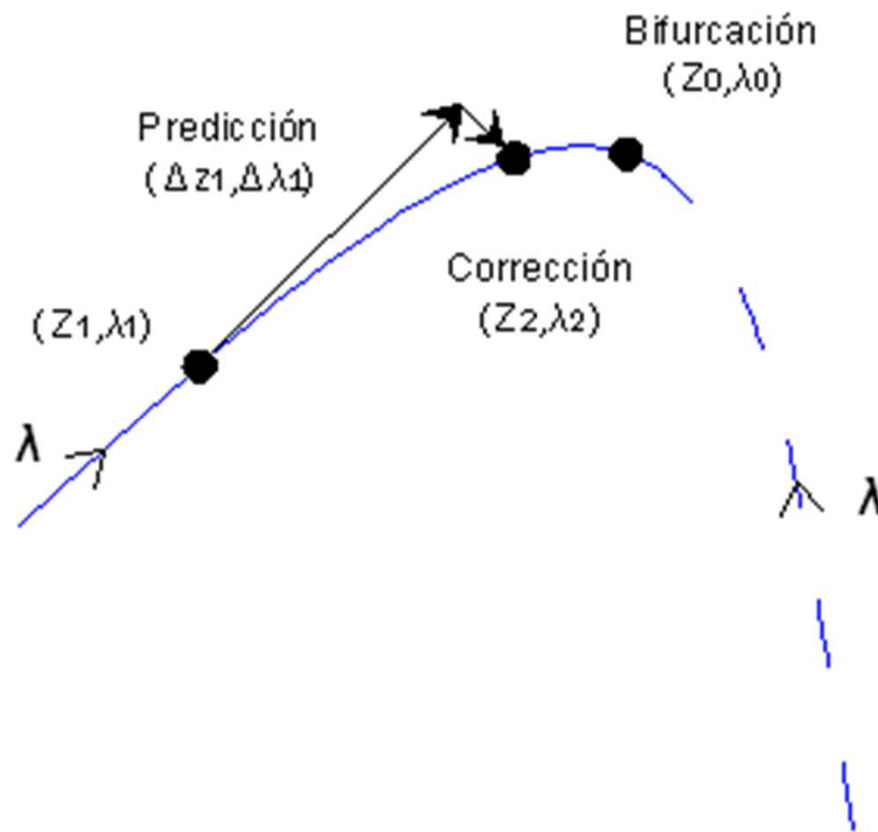


Figura 2. Curva P-V, para una bifurcación SNB típica

Método de Continuación o continuado

Estos métodos están diseñados para determinar eficientemente los diagramas de bifurcación y son básicamente técnicas desarrolladas para el cálculo de los puntos de equilibrio del sistema con respecto a variaciones de los parámetros de bifurcación λ .



Método de predicción-corrección para determinar diagramas de bifurcación

Índices

Existe una gran variedad de índices que se han propuesto para determinar la proximidad de un sistema eléctrico a bifurcaciones silla. La idea general de estos índices es el generar un valor numérico que le permita al operador determinar en tiempo real si el sistema se encuentra cercano a un punto de colapso debido a bifurcaciones silla, de tal forma que se puedan tomar medidas preventivas para evitar problemas de estabilidad. Por ejemplo, para detectar la proximidad de un sistema a una bifurcación silla, se puede usar el autovalor real más pequeño de la matriz de estado o su valor singular, los cuales se pueden calcular con relativa facilidad.

De entre los índices que se han propuesto en la literatura, uno de los que no presenta problemas de no linealidad y saltos discretos en su valor es el margen de cargabilidad, que no es más que la distancia, en términos del parámetro de bifurcación λ , del punto de operación al punto de bifurcación, esto es:

$$\|\lambda_0 - \lambda\|$$

Análisis N-1 contingencias

Conocer el grado de seguridad eléctrica de un sistema eléctrico de potencia es de crucial importancia tanto en tareas de planificación como en la explotación diaria. La seguridad del sistema siempre debe ser entendida como seguridad frente a una serie de contingencias determinadas previamente, y que, por tanto, condicionan el propio concepto de seguridad y su cuantificación. En este sentido, las contingencias que se consideran normalmente son las siguientes:

- El fallo simple de cualquier elemento del sistema (Generador, línea y transformador), criterio que se conoce como N-1.
- El fallo simultáneo de líneas en paralelo.
- En casos especiales, el fallo del mayor generador de una zona y de una de sus líneas de interconexión con el resto del sistema.

PSAT

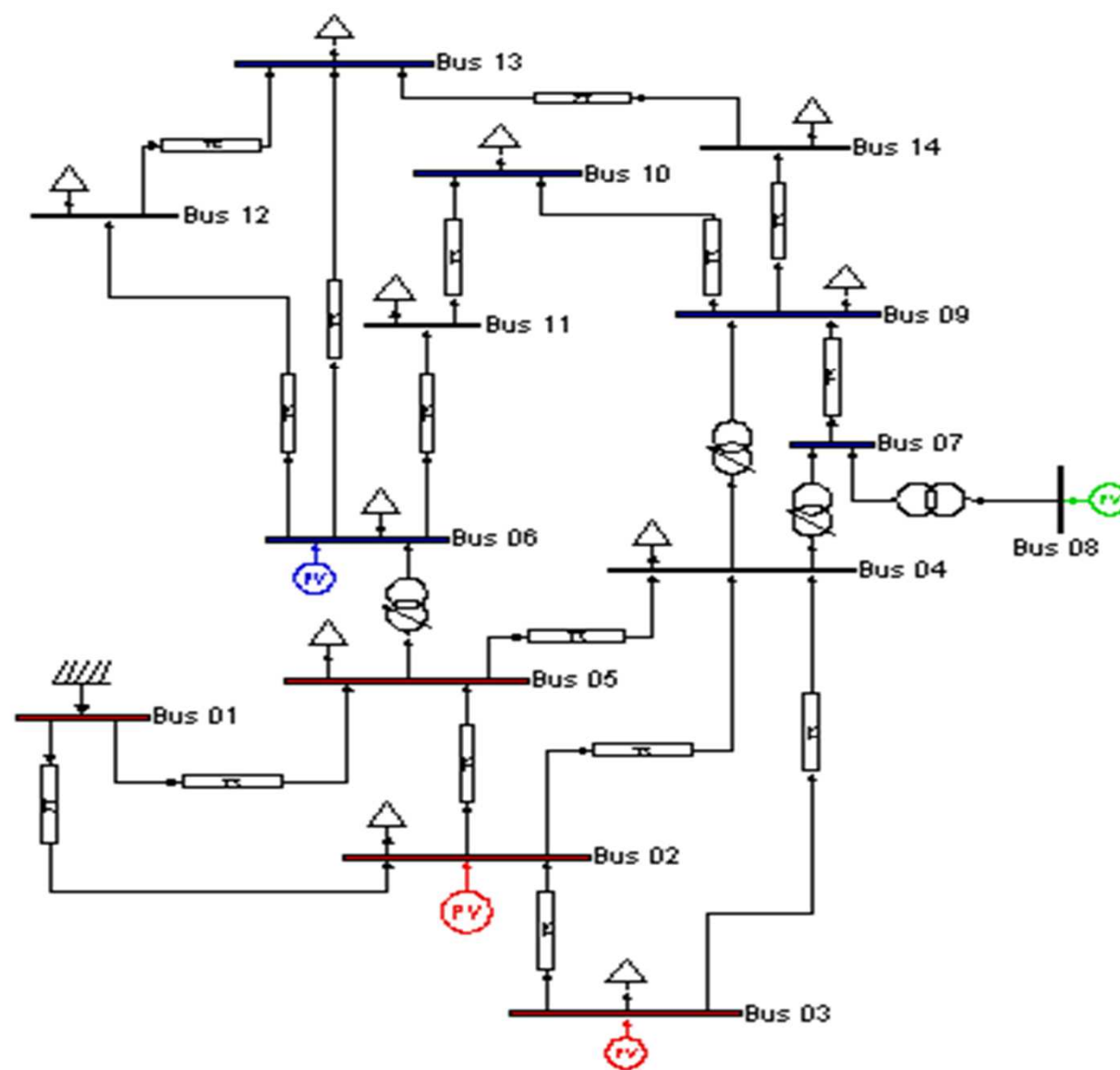
PSAT “caja de herramientas para el análisis de sistemas eléctricos de potencia”

- PSAT, “Power System Analysis Toolbox”, es un programa para el análisis de sistemas de potencia que se ejecuta bajo una plataforma Matlab, contiene varios módulos de análisis muy eficientes computacionalmente, estos son:
- Power Flow (PF): Permite calcular el flujo de potencia convencional.
- Continuation Power Flow y/o Voltage Stability Analysis (CPF-VS): Permite calcular el flujo de potencia continuado tomando en cuenta el tipo de bifurcación (Silla o limite), limites de operación de los elementos del sistema así como las restricciones de la red, ofrece la posibilidad de construir las curvas P-V proporcionando también el parámetro de carga máximo, es decir, el punto de potencia máxima de la curva.
- Optimal Power Flow (OPF): Permite calcular flujo de potencia óptimo tomando en cuenta varias restricciones, maximizando la distancia al punto de colapso.
- Small Signal Stability Analysis (SSA): Permite entre otras cosas calcular los valores propios de la matriz Jacobiana del sistema (Eigenvalues) proporcionando a la vez todos los factores de participación del sistema. Es posible también hacer un análisis de sensibilidad V-Q.
- Time Domain Simulation (TD): Permite hacer análisis de sistemas de potencia en el dominio del tiempo, tomando en cuenta las dinámicas de diversos elementos que se encuentran en los sistemas reales.
- N-1 Contingency Analysis: Permite hacer un análisis de contingencias del sistema ejecutando múltiples cálculos de flujo de potencia continuado

PSAT

Para cada módulo de análisis PSAT proporciona una interface gráfica al usuario, que permite ver con facilidad los resultados a través de graficas, reportes y diagramas de barras, además cuenta con una librería Simulink que contiene diversos elementos que modelan la redes actuales de la manera más fiel posible, lo cual hace de PSAT una herramienta muy versátil y útil para el análisis de sistemas de potencia.

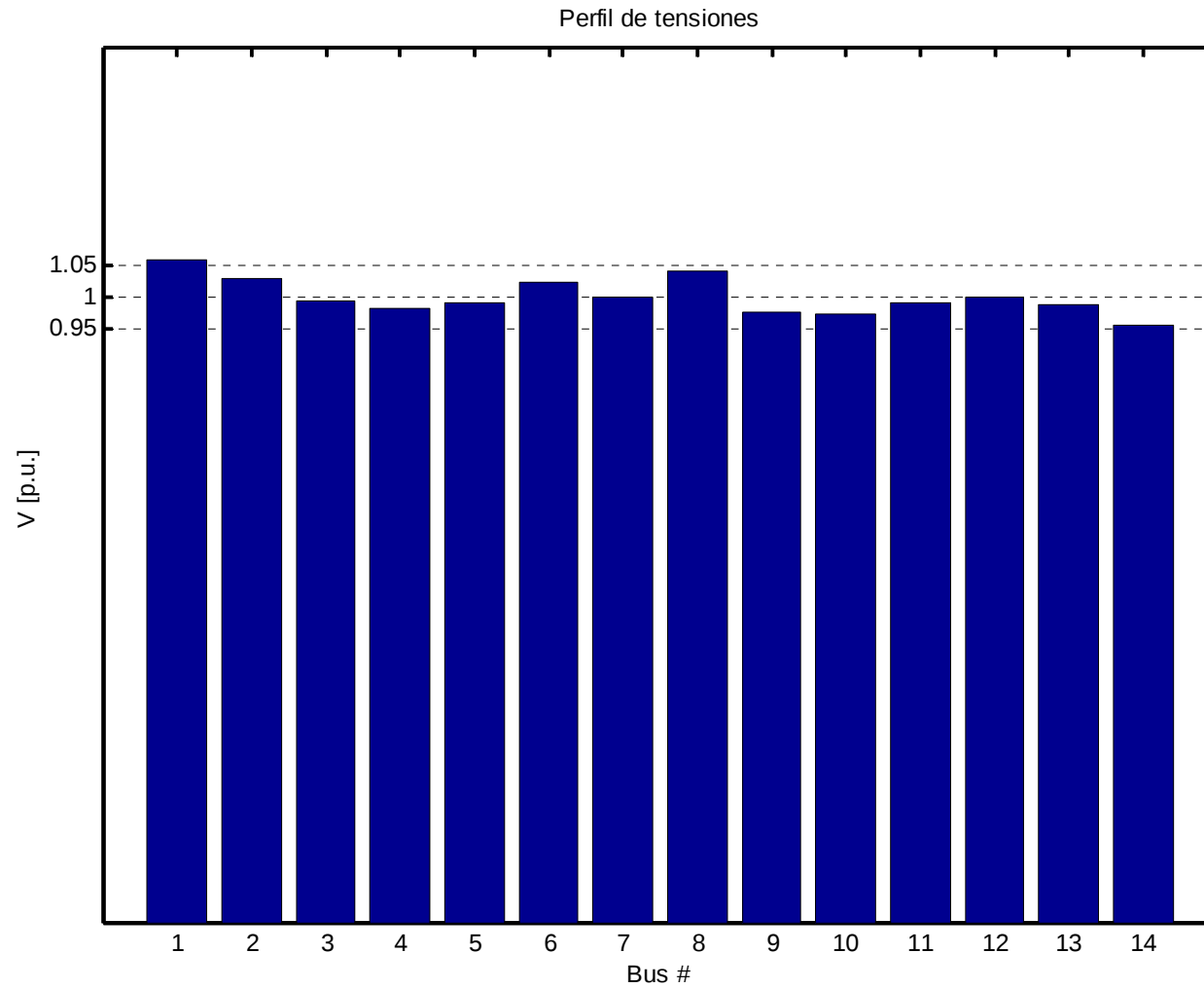
EJEMPLO



EJEMPLO. Perfil de tensiones y margen de estabilidad de tensión en el caso base

Barra	Vm [p.u]	δ (Grados)
1	1,06	0
2	1,03	-5
3	0,99207	-13,67
4	0,98222	-11,2118
5	0,98932	-9,5193
6	1,022	-15,5598
7	1,0005	-13,8662
8	1,0405	-11,9268
9	0,97548	-16,5961
10	0,9724	-16,8582
11	0,99154	-16,3939
12	0,99795	-16,9016
13	0,98878	-17
14	0,95378	-18,4009
λ		
p.u	MW	%
0,1393	61,33	13,93

Perfil de tensiones y margen de estabilidad de tensión en el caso base



Determinación de las contingencias más severas

Para determinar las contingencias más severas desde el punto de vista de la estabilidad de tensión se aplicara el estudio de N-1 contingencias , de acuerdo a esto se hará una lista de todas las posibles contingencias, las cuales se aplican al sistema y mediante el flujo de potencia continuado el programa PSAT obtiene el parámetro de carga máximo que permite calcular el margen de estabilidad de tensión .Finalmente, se ordenan las contingencias de forma descendente según su severidad de acuerdo al margen de estabilidad del sistema. En la Tabla puede verse el listado de contingencias ya ordenado, donde las contingencias sombreadas de gris representan aquellas que llevan el sistema al colapso de tensión y las sombreadas de azul representan aquellas que no violan el margen de seguridad del 7%

Determinación de las contingencias más severas

Lista de N-1 contingencias posibles de acuerdo al margen de estabilidad

N-1 CONTINGENCIAS					
Nº	Salida	λ^*	Nº	Salida	λ^*
1	T 5-6	Colapso	12	G 8	0,0372
2	L 2-3	Colapso	13	L 5-4	0,042
3	L 7-9	Colapso	14	L 2-5	0,0673
4	L 1-5	Colapso	15	T 4-9	0,0702
5	G 3	0,0116	16	G 2	0,088
6	G 6	0,0123	17	L 13-14	0,1018
7	L 2-4	0,0242	18	L 6-11	0,1102
8	T 4-7	0,0308	19	L 6-12	0,1166
9	L 9-14	0,0326	20	L 9-10	0,1144
10	L 6-13	0,0372	21	L 11-10	0,13
11	T 8-7	0,0372	22	L 3-4	0,1315