

Estabilidad de Voltaje

Parámetros de Cálculo (VS)

Para modificar las opciones de cálculo de Estabilidad de Voltaje, se debe seleccionar "Análisis – Estabilidad de Voltaje – Parámetros...", en el menú

Análisis de Sensibilidad / Análisis Modal

Habilitar Análisis de Sensibilidad V-Q	S	Habilita el análisis de sensibilidad V-Q para el cálculo de Estabilidad de Voltaje.
Habilitar Análisis modal Q-V	M	Habilita el análisis modal Q-V para el cálculo de Estabilidad de Voltaje.

Opciones

Nodos sin Elementos de Carga	M	Q=0, <i>constante</i> : la variación de potencia reactiva de los nodos que no tienen elementos de carga conectados, es cero. Q <i>variable</i> : la potencia reactiva de los nodos sin elementos de carga conectados, es variable.
Número Máximo de Valores Propios	M	Número máximo de valores propios (eigenvalues) almacenados
Límites para sensibilidad. Mutuas / Fact. de Participa.	S, M	No se almacenarán valores menores que el ...% del valor máximo.

Resultados

Sensibilidades Mutuas de Nodos	S	Además de las sensibilidades propias de los nodos $\partial V_i / \partial Q_i$, también se almacenan sus sensibilidades mutuas $\partial V_k / \partial Q_i$.
Fact. de Participación de Nodos	M	Se guardan o almacenan los factores de participación de los nodos.
Fact. de Participación de ramas.	M	Se guardan o almacenan los factores de participación de las ramas.
Fact. de Participación de Generadores	M	Se guardan o almacenan los factores de participación de los generadores.
Valores Propios	M	Se guardan o almacenan los valores propios.

S: Se usa en análisis de sensibilidad

M: Se usa en análisis modal

Curvas V-Q

Habilitar cálculo de curvas V-Q	Habilita el cálculo de las curvas V-Q en los análisis de Estabilidad de Voltaje
---------------------------------	---

Intervalo de Voltaje

Límite Inferior	Punto inicial de las curvas V-Q
Límite Superior	Punto final de las curvas V-Q
Incremento	Distancia entre 2 puntos

Convención de signo para potencia reactiva	Determina si la inyección de potencia reactiva o el consumo de potencia reactiva, es positivo.
Seleccionar nodos	Selecciona los nodos a los que se les debe calcular las curvas V-Q.

Curvas P-V

Habilitar cálculo de curvas P-V	Habilita el cálculo de las curvas P-V en los análisis de Estabilidad de Voltaje
---------------------------------	---

Factor de Escalamiento de Carga

Límite Inferior	Punto inicial de las curvas P-V
Límite Superior	Punto final de las curvas P-V. Se debe ajustar en un valor alto (p.e. 10^6) si se desea que el punto final sea el de colapso de voltaje.
Incremento Inicial	Distancia máxima entre 2 puntos, incremento en el inicio de la simulación
Incremento Final	Distancia mínima entre 2 puntos, incremento en el punto de colapso de voltaje. El incremento se ajusta automáticamente desde "Incremento Inicial" hasta "Incremento Final"

Programación de la Generación de acuerdo a

P oper	La producción de potencia se asigna en forma proporcional al parámetro P oper
Estatismo MW/Hz	La producción de potencia se asigna en forma

	proporcional al parámetro del elemento 'Estatismo MW/Hz'.
Sr	La producción de potencia se asigna en forma proporcional al parámetro del elemento Sr.
Considerar Pmín / Pmáx	Si se activa, la potencia activa asignada estará entre los límites Pmín y Pmáx.

Cálculos P-V	Lista de cálculos P-V definidos
Identificador	Nombre del cálculo
Cargas	Número de las cargas seleccionadas para ser escaladas
Generadores	Número de generadores seleccionados para ser escalados
Nodos	Número de nodos a ser grabados
Nuevo	e insertar un nuevo ítem en la lista de cálculo
Eliminar	Permite eliminar el ítem seleccionado de la lista
Seleccionar todos	Habilita todos los ítems
Ninguno	Inhabilita todos los ítems
Elementos...	Determina las cargas y generadores a ser escalados y los nodos a ser grabados, para los ítems seleccionados.

Para dar inicio al análisis de Estabilidad de Voltaje, "Análisis – Estabilidad de Voltaje – Calcular", en el menú. Para ejecutar los cálculos de Estabilidad de Voltaje en una red parcial, se debe seleccionar "Análisis – Estabilidad de Voltaje – Redes Parciales...".

Archivos de Resultados

Nombre del Archivo	Nombre del archivo o de la ruta completa del archivo
...	Selecciona la ruta completa del archivo
Crear luego de cálculos	El archivo se crea en forma automática una vez finalizados los cálculos
Crear archivo de exportación	Se crea el archivo.

Resultados

Resultados Gráficos

Para abrir la ventana de resultados gráficos, se debe seleccionar "Análisis – Estabilidad de Voltaje – Resultados Gráficos...".

Parámetros Subgráfico:

Tipo Subgráfico	Permite seleccionar los resultados a ser desplegados
Agregar curvas manualmente	Si se marca, las curvas se deben agregar por medio de la pestaña "Curvas". En caso contrario, la pestaña "Curvas" no será visible, y las curvas de la variante actual serán adicionadas automáticamente de acuerdo a la configuración de los siguientes 4 subgráficos.
Selecc. Valor Propio	Permite seleccionar valores propios (para gráficos de participación)
Seleccionar Nodo	Permite seleccionar nodos (para diagrama de sensibilidad con nodos mutuos)
Selecc. curvas V-Q	Permite seleccionar las curvas V-Q a ser desplegadas (para el gráfico de la curva V-Q)
Selecc. curvas P-V	Permite seleccionar las curvas P-V a ser desplegadas (para el gráfico de la curva P-V)

Propiedades de Ejes

Seleccionar eje	Selecciona los ejes cuya configuración se debe desplegar / modificar
Título	Título del eje. Se habilita sólo si la casilla de chequeo correspondiente "Automático" no se ha seleccionado.
Resolución	Especifica la resolución de los pasos entre etiquetas. Se habilita sólo si la casilla de chequeo correspondiente "Automático" no se ha seleccionado.
Nro de decimales	Número de dígitos decimales de la etiqueta. Se habilita sólo si la casilla de chequeo correspondiente "Automático" no se ha seleccionado
Mín	el valor mínimo del eje. Se habilita sólo si la casilla de chequeo correspondiente "Automático" no se ha seleccionado".
Máx	Permite ajustar el valor máximo del eje. Se habilita sólo si la casilla de chequeo correspondiente "Automático" no se

	ha seleccionado.
Cuadrícula	Si se marca, se despliegan las líneas de la cuadrícula.

Leyenda

Mostrar Leyenda	Si se marca, se despliega la leyenda
Altura	Altura de la leyenda en % del tamaño del subgráfico.

La pestaña “Curvas” sólo se hace visible si se selecciona “Agregar curvas manualmente”. Para adicionar una nueva curva al subgráfico, se debe presionar el botón “Agregar Curva”; para modificar la configuración de la curva seleccionada, se debe presionar el botón “Editar Curva”.

Configuración de Curvas:

Nombre Curva	Nombre de la curva que será utilizado para la leyenda. Este campo sólo se habilita si no se selecciona “Crear nombre automáticamente”.
Crear Nombre Automáticamente	Crea el nombre de la curva en forma automática.
Variante	Permite seleccionar la variante
Cálculo P-V	Permite seleccionar el cálculo P-V. Se habilita sólo para gráficos de curvas P-V.
Nombre Nodo, ID	Permite seleccionar el nodo. Se habilita para gráficos de sensibilidad con nodos mutuos y gráficos de curvas V-Q y P-V.
Valor Propio	Permite seleccionar valores propios. Se habilita sólo para gráficos de participación.

Tablas de Resultados

Para abrir las tablas de resultados, se debe seleccionar "Análisis – Estabilidad de Voltaje – Tablas Resultados". Estas tablas despliegan todos los resultados numéricos calculados y almacenados.

Teoría

Introducción

El análisis de Estabilidad de Voltaje puede llevarse a cabo mediante dos métodos diferentes, las simulaciones en el tiempo y los métodos estáticos. Las simulaciones en el tiempo capturan los eventos y su momento de ocurrencia para llegar a la inestabilidad. El computador debe resolver las ecuaciones diferenciales que describen el sistema de potencia. Las simulaciones en el tiempo son valiosas para estudios detallados de situaciones *concretas* de colapsos de voltaje y su relación con los controles y con la coordinación de protecciones. Se puede usar el módulo de Análisis Dinámico para llevar a cabo dichas 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. El módulo de Estabilidad de Voltaje contiene 4 métodos estáticos: Análisis de Sensibilidad V-Q, 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.

Análisis de Sensibilidad V-Q

El análisis de sensibilidad V-Q calcula la relación entre el cambio en el voltaje y el cambio en la potencia reactiva.

$$\Delta V = J_R^{-1} \cdot \Delta Q$$

ΔV Cambio incremental en la magnitud del voltaje de nodo (vector)

ΔQ Cambio incremental en la inyección de potencia reactiva en el nodo (vector)

J_R Matriz Jacobiana reducida

Los elementos de la inversa de la matriz Jacobiana reducida J_R son las sensibilidades V-Q. Los componentes de la diagonal son las auto-sensibilidades $\partial V_i / \partial Q_i$, y los elementos fuera de la diagonal son las sensibilidades mutuas $\partial V_k / \partial Q_i$. Las sensibilidades de los nodos con control de voltaje son iguales a cero.

Sensibilidades Positivas: Operación estable; entre menor sea la sensibilidad, más estable es el sistema. A medida que la estabilidad disminuye, la sensibilidad se incrementa, llegando a ser infinita en el límite de estabilidad (máxima cargabilidad).

Sensibilidades Negativas: Operación inestable. El sistema no es controlable, debido a que todos los equipos de control de potencia reactiva están diseñados para operar satisfactoriamente cuando un incremento en Q ocasiona un incremento en V.

Análisis Modal Q-V

El enfoque del análisis modal tiene la ventaja adicional de que entrega información relacionada con el mecanismo de inestabilidad. Las características de estabilidad de voltaje del sistema se pueden identificar al calcular los valores propios (eigenvalues) y vectores propios (eigenvectors) de la matriz Jacobiana reducida $\mathbf{J}_R$.

$$\mathbf{J}_R = \xi \cdot \Lambda \cdot \eta$$

Λ Diagonal de valores propios de la matriz

ξ Matriz de vectores propios derechos

η Matriz de vectores propios izquierdos

ξ_i $i^{\text{ésimo}}$ vector propio derecho, $i^{\text{ésima}}$ columna de la matriz de vectores propios derechos.

η_i $i^{\text{ésima}}$ vector propio izquierdo, $i^{\text{ésima}}$ fila de la matriz de vectores propios izquierdos.

Al hacer uso de las técnicas de análisis modal, el problema original (ver capítulo “Análisis de Sensibilidad V-Q”)

$$\Delta \mathbf{U} = \mathbf{J}_R^{-1} \cdot \Delta \mathbf{Q}$$

se transforma en

$$\mathbf{u} = \Lambda^{-1} \cdot \mathbf{q}$$

$\mathbf{u} = \eta \cdot \Delta \mathbf{U}$ vector de variaciones del voltaje modale

$\mathbf{q} = \eta \cdot \Delta \mathbf{Q}$ vector de variaciones de la potencia reactiva modal

La diferencia entre estas dos ecuaciones es que Λ^{-1} es una matriz diagonal, mientras que la matriz Jacobiana reducida generalmente es no diagonal. La transformación inversa está dada por

$$\Delta \mathbf{U} = \xi \cdot \mathbf{u}$$

$$\Delta \mathbf{Q} = \xi \cdot \mathbf{q}$$

Valores Propios Positivos: El sistema es estable en términos de estabilidad de voltaje. Entre menor sea la magnitud, más cerca estará el $i^{\text{ésimo}}$ voltaje modal a ser inestable. La magnitud de los valores propios es una medida relativa de la proximidad a la inestabilidad.

Valores Propio Cero: El $i^{\text{ésimo}}$ voltaje modal colapsa, ya que cualquier cambio en la potencia reactiva modal produce un cambio infinito en el voltaje modal.

Valor propio negativo: El sistema es inestable en términos de estabilidad de voltaje.

Para efectos prácticos, los valores y vectores propios de la matriz Jacobiana reducida, son reales. Si para “Nodos sin elementos de carga” se selecciona la opción “Q=0, Constante”, los nodos sin elementos activos tendrán un valor de $\Delta Q = 0$. En este caso, la variable ΔU de estos nodos depende sólo de de las magnitudes de voltajes de otros nodos y será eliminada.

Factores de participación de nodos: La participación relativa de un nodo en un cierto modo está dada por el factor de participación del nodo. Los factores de participación de los nodos determinan las áreas para cada modo. De esta forma se identifican las áreas débiles de voltaje o áreas inestables (no controlables). La suma de todas las participaciones de los nodos en un modo dado es igual a la unidad. La magnitud de la participación de un nodo en un modo dado es un indicativo de la efectividad de las medidas remediales aplicadas a ese nodo para estabilizar el modo.

Factores de participación de ramas: La participación relativa de la rama j en un cierto modo está dada por el factor de participación

$$P_j = \frac{\Delta Q_{loss\ j}}{\max_j [\Delta Q_{loss\ j}]}$$

Los factores de participación de ramas indican, para cada modo, las ramas que consumen más potencia reactiva, en respuesta a un cambio incremental en la carga reactiva. Las ramas con altas participaciones son enlaces débiles o son ramas altamente cargadas. Las participaciones de las ramas son útiles para identificar las medidas remediales que permiten corregir problemas de estabilidad de voltaje y para seleccionar contingencias.

Factores de participación de generadores: la participación relativa de una máquina m en un cierto modo, está dada por el factor de participación del generador

$$P_m = \frac{\Delta Q_m}{\max_m [\Delta Q_m]}$$

Los factores de participación de generadores indican, para cada modo, los generadores que suministran más potencia reactiva, en respuesta a un cambio incremental en la cargabilidad reactiva del sistema. La participación de los

generadores provee información importante con respecto a la distribución apropiada de reservas de reactivos entre todas las máquinas, con el objeto de mantener un margen adecuado de estabilidad de voltaje.

Curvas V-Q

Las curvas V-Q se producen al correr de una serie de casos de flujo de carga. Las curvas V-Q muestran la cantidad necesaria de potencia reactiva Q para obtener un nivel específico de voltaje V . El punto mínimo de una curva V-Q (inyección positiva de potencia reactiva) es el punto crítico, es decir, todos los puntos de la curva a la izquierda del valor mínimo son inestables. Asimismo, los puntos a la derecha del valor mínimo se consideran estables. Si el punto mínimo de la curva V-Q está por encima del eje horizontal, el sistema es deficiente en potencia reactiva. En este caso se requiere una inyección adicional de potencia reactiva con el fin de prevenir un colapso de voltaje. Si el punto crítico está por debajo del eje horizontal, el sistema tiene algún margen de VARs. Si se desea un margen mayor de potencia reactiva, es necesaria una alimentación adicional.

El colapso de voltaje se inicia en el nodo más débil y se va propagando a otros nodos débiles. Por lo tanto, el nodo más débil es el más importante en los análisis de colapso de voltaje al usar las técnicas de las curvas V-Q. El nodo más débil es aquel que presenta una de las siguientes condiciones: a) tiene el punto de colapso de voltaje más alto, b) tiene el margen de potencia reactiva más bajo, c) tiene la mayor deficiencia de potencia reactiva o d) tiene el cambio más alto de voltaje, en porcentaje.

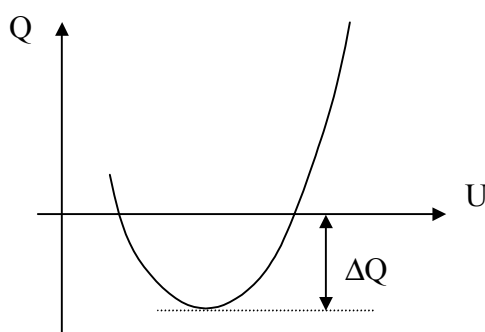


Fig. 14.1 Curva V-Q con Margen de VAR ΔQ

Curvas P-V

Las curvas P-V se producen al correr de una serie de casos de flujo de carga. Las curvas P-V relacionan los voltajes de nodo con las cargas, en una región específica. Los beneficios de esta metodología consisten en que ésta provee una

indicación de la proximidad a un colapso de voltaje en todo un rango de niveles de carga.

El fenómeno del colapso de voltaje consiste en que a medida que se incrementan las transferencias de potencia en una región bien delimitada, el perfil de voltaje en esa región disminuirá más y más, hasta que se alcanza un colapso de voltaje. Los voltajes en nodos específicos de la región pueden variar significativamente, y algunos voltajes de nodo podrían parecer aceptables. Sin embargo, el punto de colapso para todos los nodos de la región de estudio ocurrirá al mismo nivel de importación de potencia, independientemente de los voltajes de los nodos específicos.

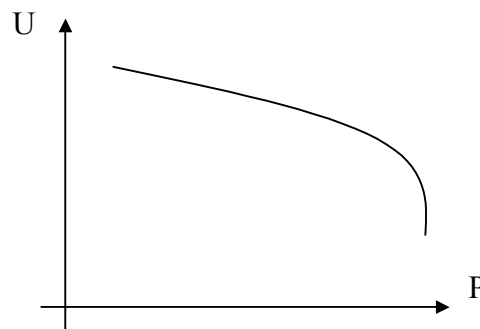


Fig. 14.2 Curva P-V

Antes de que se ejecuten las corridas, se debe definir lo siguiente:

- Un grupo de cargas a ser escalado
- Un grupo de generadores a ser escalado
- Un grupo de voltajes de nodo a ser grabado (registrado)
- Los niveles de la carga al inicio de la simulación
- El incremento de la carga
- Los niveles de carga al final de la simulación, si se desea que la simulación se detenga antes que se llegue al punto de colapso.