



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA - SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA APLICANDO TEORÍA DE BIFURCACIONES

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ISMAEL DÍAZ ALEMÁN

TUTOR PRINCIPAL
DR. PAUL ROLANDO MAYA ORTIZ
PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

CDMX, NOVIEMBRE 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Espinosa Pérez Gerardo René

Secretario: Dr. Trillaud Pighi Frédéric

Vocal: Dr. Maya Ortiz Paul Rolando

1er. Suplente: Dr. Castro González Luis Miguel

2o. Suplente: Dr. Sandoval Rodríguez Gonzalo

La tesis se realizó en el Instituto de Ingeniería, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Paul Rolando Maya Ortiz

Dedico este trabajo principalmente a mis padres , por haberme apoyado y acompañado en este momento tan importante de mi formación profesional.

A ellos les agradezco por ser el pilar mas importante en mi vida y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar las circunstancias.

Al Dr. Paul Rolando Maya Ortiz por que mas que un gran maestro, tutor, consejero, profesionalista, es un gran amigo.

A Andrea Moserrat A. que siempre me apoyo en el cumplimiento de mis metas.

A mis compañeros Jaqueline, Natanael y Gabriel Deras que siempre me apoyaron.

Díaz Alemán Ismael.

Resumen

En esta tesis de maestría se analiza la estabilidad de tensión de un sistema de potencia aplicando la teoría de bifurcaciones. Posteriormente se emplean un par de compensadores FACTS más utilizados en la industria eléctrica para mostrar cómo su uso ayuda a mejorar las propiedades de estabilidad del sistema y se hace una comparación entre ellos para analizar el posible retraso o desaparición de bifurcaciones.

Estas bifurcaciones pueden representarse en los sistemas eléctricos de potencia cuando se encuentran altamente estresados. El estudio se realizó para el sistema de nueve nodos del Western System Coordinating Council (WSCC9).

Índice general

Índice de figuras	VII
Índice de tablas	IX
1. Introducción	1
1.1. Presentación	1
1.2. Motivación	2
1.3. Necesidad	4
1.4. Planteamiento del problema	4
1.5. Hipótesis	5
1.6. Objetivos	5
1.7. Estado del arte	5
2. Estabilidad de tensión	9
2.1. Conceptos sobre estabilidad de tensión	9
2.2. Cambios en el sistema de potencia que contribuyen al colapso de tensión	11
2.3. Estudio de bifurcaciones en los sistemas eléctricos de potencia	14
2.3.1. Modelo matemático	14
2.3.2. Bifurcaciones Nodo Silla (SNB)	15
2.3.3. Bifurcaciones Hopf	17
2.4. Métodos de análisis de estabilidad de tensión	19
2.4.1. Flujos de potencia	19
2.4.2. Curvas P-V	21
2.4.3. Análisis P-V	21
2.4.4. Generación de las curvas P-V	22
3. Modelo del Sistema Eléctrico y dispositivos FACTS	25
3.1. Sistema Eléctrico de Potencia	25
3.1.1. Consideraciones y Restricciones	25
3.1.2. Modelo del Sistema Eléctrico de Potencia	27
3.2. Compensador Estático de Var's.	30
3.2.1. Característica de Operación del Compensador Estático de Var's.	30
3.2.2. Modelo del SVC	33

ÍNDICE GENERAL

3.3. Compensador Estático Síncrono	35
3.3.1. Características de Operación del Compensador Estático Síncrono.	35
3.3.2. Modelo del STATCOM	38
4. Análisis de Resultados del sistema eléctrico de potencia de nueve nodos (WSCC9)	41
4.0.2.1. Compensación SVC	48
4.0.2.2. Compensación STATCOM	54
4.0.2.3. Comparativo	61
5. Conclusiones	65
Bibliografía	67

Índice de figuras

2.1. Clasificación en Sistemas de Potencia (22)	9
2.2. Modelo básico de un sistema de potencia	11
2.3. Curva de estabilidad de voltaje de estado estacionario.	12
2.4. Destrucción de los puntos de equilibrio	15
2.5. Bifurcación nodo silla	16
2.6. Bifurcación nodo silla	16
2.7. Diagrama de valores propios	17
2.8. Ubicacion de valores propios para una bifurcacion Hopf	18
2.9. Curvas PV	23
3.1. Línea de Transmisión	28
3.2. Balance de potencia	29
3.3. Característica en estado estable de un SVC	31
3.4. Representación esquemática del SVC	32
3.5. Modelo de susceptancia variable del SVC	33
3.6. Sistema del STATCOM.	35
3.7. Curva característica V-I del STATCOM	36
3.8. Curva característica V-Q del STATCOM	37
3.9. Circuito equivalente del STATCOM	38
4.1. Sistema Eléctrico de Potencia de 9 Nodos (WSCC9)	41
4.2. Curva PV del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) con un incremento de potencia del 137 %	44
4.3. Movimiento de los Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) ante el incremento de potencia al 137 %	45
4.4. Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) cuando se encuentra con una carga al 137 %	46
4.5. Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) con un incremento de 150 %	47
4.6. Curvas PV del sistema(WSCC9), compensado en el nodo 9, con un incremento de carga del 140 %	50
4.7. Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) con un incremento hasta el 140 %	51

ÍNDICE DE FIGURAS

4.8. Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) con carga al 140 % . . .	52
4.9. Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) con un incremento de carga al 150 %	53
4.10. Curvas PV del sistema(WSCC9), compensado en el nodo 9, con un incremento de carga del 144 %	56
4.11. Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) ante un incremento del 144 %	58
4.12. Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) con una carga del 144 %	59
4.13. Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) ante un incremento de carga del 150 %	60
4.14. Bifurcaciones nodo-silla en el nodo 9	62
4.15. Movimiento de los Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) sin compensación	63
4.16. Movimiento de los Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) compensado en el nodo 9 con un SVC	63
4.17. Movimiento de los Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) compensado en el nodo 9 con un SSC	64

Índice de tablas

3.1. Tipos de Nodos	27
4.1. Datos del SEP de 9 nodos (WSCC9)	42
4.2. Parámetros de las líneas de transmisión del SEP de 9 nodos (WSCC9)	42
4.3. Resultados del SEP de 9 nodos (WSCC9) mediante un análisis de flujos de potencia	43
4.4. Voltajes del SEP de 9 nodos (WSCC9), caso base	44
4.5. Ángulos del SEP de 9 nodos (WSCC9), caso base	45
4.6. Datos del SEP de 9 nodos (WSCC9)	48
4.7. Comparativo del SEP de 9 nodos (WSCC9) entre el caso base y con un SVC	49
4.8. Datos del SVC	49
4.9. Voltajes del SEP de 9 nodos (WSCC9) con un SVC en el nodo 9	50
4.10. Ángulos del SEP de 9 nodos (WSCC9) con un SVC en el nodo 9	51
4.11. Datos del SEP de 9 nodos (WSCC9)	54
4.12. Comparativo del SEP de 9 nodos (WSCC9) entre el caso base y un STATCOM	55
4.13. Datos del STATCOM	55
4.14. Voltajes del SEP de 9 nodos (WSCC9) con un STATCOM en el nodo 9	57
4.15. Ángulos del SEP de 9 nodos (WSCC9) con un STATCOM en el nodo 9	57
4.16. Comparativo de los 3 Compensadores	61
4.17. Potencia Real alcanzada con cada compensador	62

Introducción

1.1. Presentación

El análisis de la estabilidad de voltaje ha sido desde los años 60's un tema de gran importancia debido a los colapsos de voltaje presentados mundialmente. Todos estos eventos dieron origen a investigaciones y propuestas de métodos de estudio para detectar y predecir la inestabilidad de voltaje con buena precisión.

Para realizar estudios de estabilidad de voltaje en un Sistema Eléctrico de Potencia es necesario conocer su configuración (topología), y sus parámetros. Además, se deben emplear técnicas de análisis y utilizar herramientas computacionales adecuadas. El resultado de estos estudios presenta los estados operativos del sistema, los márgenes y límites de estabilidad con el fin de llevar a cabo acciones preventivas y/o correctivas.

Actualmente, las presiones económicas y ambientales hacen que los sistemas de potencia estén trabajando constantemente cerca de los límites de operación, por lo cual se hace difícil mantener niveles adecuados de voltaje a lo largo del sistema. Esto ha conducido a un incremento en el número de incidentes de colapso de voltaje, trayendo como consecuencia interrupciones en gran escala, pérdidas económicas y malestar social.

El colapso de voltaje está caracterizado por una variación lenta del punto de operación debido al incremento de carga de tal forma que las magnitudes de voltaje decrecen gradualmente hasta que ocurre un cambio acelerado (9),(8).

El problema existe esencialmente debido al desconocimiento de la dinámica de la tensión del sistema, por lo cual, se puede estar trabajando cerca o sobre el límite de estabilidad. Las causas del problema se asocian con falta de suministro de potencia reactiva.

En el pasado, se había planteado un debate significativo sobre si el problema de colapso de voltaje es de naturaleza estático y, por lo tanto, debe ser estudiado como un problema de flujo de carga paramétrico, o si es dinámico y debe ser estudiado como la solución de un conjunto de ecuaciones diferenciales. Durante las últimas décadas un gran número de investigadores ha discutido sobre la aplicación de la teoría de los sistemas dinámicos no lineales al estudio de la

estabilidad de los sistemas de potencia (12), (7), (10), (20).

La pérdida de estabilidad de voltaje generalmente causada por una alteración o cambio en las condiciones de uno o de varios parámetros del sistema de potencia, lo que crea una mayor demanda de potencia reactiva [Md. Khurram, 2013] (32).

El análisis de flujo de carga es el enfoque más importante y esencial para la investigación sobre los problemas de funcionamiento y planificación del sistema eléctrico. Sobre la base de una estructura de red especificada de generación y transmisión, el análisis de flujo de carga resuelve el funcionamiento del sistema de potencia al mantener un estado estable con voltajes nodales y el flujo de potencia nominales [F. Buerrouk, 2014](5).

El análisis de flujo de carga puede proporcionar un estado de funcionamiento para la dirección, planificación, ejecución, y el desarrollo de estrategias de control del sistema de potencia.

Gracias al desarrollo de la tecnología en electrónica de potencia, la aplicación de diversas cargas no lineales (tales como horno de arco eléctrico, locomotora eléctrica de frecuencia variable, velocidad del control de motor de alta tensión, GTO, IGBT y otros dispositivos de alta potencia controlada, etc.) hace que el voltaje de la red fluctúe con frecuencia y se presente un deterioro en la calidad de energía, lo cual afecta al funcionamiento de ciertos equipos. Con la compensación de potencia reactiva se puede mejorar el factor de potencia, se mantiene un voltaje estable, y se reduce las fluctuaciones de voltaje, se mejora la capacidad de transmisión a larga distancia y reduce la pérdida de energía (26). Con el rápido funcionamiento de los dispositivos FACTS, como es el caso del compensador estático de vars (SVC) y el compensador estático síncrono (STATCOM) se puede proporcionar la potencia reactiva necesaria para controlar la oscilación de voltaje (21).

Con la aplicación y análisis de las curvas PV y QV, se tiene una descripción del sistema ante la operación de dispositivos FACTS, este enfoque permite realizar acciones de control que pueden hacer operar al sistema de potencia en diferentes puntos de operación para poder evitar la inestabilidad de voltaje, compensando al sistema la potencia reactiva necesaria para poder tener valores nominales en todo el sistema (29), pero esto sin duda representa un reto tanto para los operadores de la red eléctrica como para los investigadores.

1.2. Motivación

Para que la operación sea segura y con calidad desde el punto de vista de voltaje, los sistemas eléctricos de potencia se planean y operan con la suficiente reserva de potencia reactiva en los generadores y otros elementos de compensación, de tal manera que el sistema esté en capacidad de responder ante ciertas perturbaciones y/o cambios en las condiciones de operación

El fenómeno de la estabilidad de voltaje y en especial el caso de colapso de voltaje, en los sistemas de potencia, ha sido observado y analizado extensamente desde 1970 (36). A partir de la década de los ochenta se empiezan a reportar problemas de estabilidad en todo el mundo con más frecuencia. Este aumento se debe a los cambios en las condiciones de operación del

sistema, con respecto a las características de operación imperantes hace unos cuantos años. Entre las condiciones especiales se pueden citar las siguientes [Cañizares, 1995a](8), [Hiskens y Hill, 1991](18):

- Condiciones de operación del sistema de transmisión más exigentes, lo que implica mayor cargabilidad de las líneas.
- Dificultad en la expansión de los sistemas de potencia por presiones económicas y reglamentación ambiental.
- Funcionamiento del sistema de generación bajo un esquema de mercado abierto, lo cual implica la libertad de acceso de terceros a las redes de transmisión, con poco o ningún control.

Los primeros intentos de analizar matemáticamente el problema de estabilidad de voltaje estuvieron relacionados con el análisis de la matriz Jacobiana y su proximidad a una singularidad (37). 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 QV y PV, análisis modal, métodos estocásticos, entre otros. Todos estos métodos utilizan como base el flujo de carga. Estos métodos son estáticos, pues determinan si existe posibilidad de inestabilidad de voltaje o 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.

A finales de la década de los ochenta 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 (35), (33). Para hacer tal estudio, se determinó la importancia del modelado del sistema de potencia, especialmente para la localización de los puntos de bifurcación y la correspondiente respuesta dinámica. Se empezó a hacer investigación sobre el efecto del modelado de cada uno de los componentes del sistema: generador, carga y transformador con cambio de tap, etc, utilizando modelos de tiempo continuo.

Muchos trabajos de investigación propusieron índices de estabilidad de voltaje con base a la información obtenida en la proximidad a un colapso de voltaje, tales como los que se fundamentan en el valor singular mínimo de la matriz Jacobiana (25), (6), entre otros. El método de continuación es ampliamente conocido como una herramienta poderosa (27), (1), para estimar el punto de máxima cargabilidad de los sistemas. La principal característica de este método es que permanece bien condicionado alrededor del punto crítico. Como un principio general, este método emplea un esquema predictor-corrector para encontrar la solución de un conjunto de ecuaciones de flujo de potencia, las cuales han sido reformuladas para incluir un parámetro de carga. En el año 1995, Chiang H., (11) propuso otro paquete computacional denominado CPFLOW (Continuation Power Flow), el cual es una herramienta para rastrear el comportamiento de estado estacionario de un sistema de potencia ante variaciones paramétricas.

Sin embargo, el hecho de entender la dinámica y comportamiento de este problema no es suficiente, siempre se busca que las investigaciones tengan alguna aplicación dentro de la industria eléctrica, por lo que esta es la principal motivación de este trabajo; partiendo desde el

hecho donde el análisis de estabilidad de voltaje es uno de los cálculos más utilizados, además del estudio de flujos de carga y análisis de falla.

Lo que se busca es tener una participación en la toma de decisiones a nivel operación del sistema, en donde se busca tener resultados lo suficientemente confiables en el menor tiempo posible.

1.3. Necesidad

El control de voltaje es la acción operativa para conservar los parámetros del sistema dentro de un margen de operación nominal, permitiendo un flujo de potencia reactiva adecuado en la red de transmisión, de tal manera que se pueda tener, si así se requiere, un elevado transporte de potencia activa.

El hecho de operar un sistema de potencia manteniendo los voltajes de la red dentro de ciertos márgenes, previene al sistema de las consecuencias negativas que originan los bajos voltajes sobre la red y de los efectos más graves del sobrevoltaje. La operación estable de los generadores depende en gran parte del voltaje de excitación apropiada, ya que los bajos voltajes en períodos de demanda máxima pueden conducir a inestabilidad del sistema de potencia; el sobrevoltaje constituye uno de los peores efectos de envejecimiento o pérdida de la vida útil de los equipos de las subestaciones y centrales. Otra ventaja de mantener el voltaje en los niveles adecuados es la reducción de pérdida de potencia activa y reactiva en la red de transmisión, lo que permite mantener mejores niveles de voltaje en los extremos e incrementar la capacidad de la transmisión de las líneas.

El desarrollo de esta tesis permitió realizar investigaciones en el área de estabilidad de voltaje, utilizando herramientas de análisis matemático con aplicaciones computacionales basadas en la teoría de bifurcaciones, que faciliten el análisis de las no linealidades en los sistemas de potencia y así tener conocimiento de la respuesta dinámica del voltaje en el sistema.

Aunque los mayores incidentes de colapso de tensión son relativamente escasos, la gravedad de sus consecuencias son suficiente motivación para que muchos investigadores realicen una búsqueda intensa de métodos de análisis con el fin de poder determinar su presencia y la forma en que se desarrolla y así, plantear nuevas técnicas para el planeamiento, operación y control de sistemas de potencia.

1.4. Planteamiento del problema

Se analizó un sistema eléctrico de potencia representado por un conjunto de ecuaciones algebro-diferenciales, y se compara el uso del SVC y el STATCOM, con el fin de retrasar la aparición del fenómeno de inestabilidad de voltaje ante el incremento del parámetro de carga del sistema. Esta comparación se llevó a cabo empleando la teoría de bifurcaciones y el uso de

las curvas PV y QV.

1.5. Hipótesis

- Los dos compensadores FACTS provocan un retraso en la aparición de ambas bifurcaciones.
- El desempeño del STATCOM es mejor que el desempeño del SVC para retardar la aparición de las bifurcaciones nodo silla y Hopf.
- Ninguno de los dos compensadores logra hacer desaparecer la bifurcación.

1.6. Objetivos

- Realizar la comparación en el desempeño de ambos compensadores, en cuanto a retrasar o desaparecer las bifurcaciones nodo silla y Hopf.
- Determinar la carga máxima que puede ser suministrada en el Sistema Eléctrico de Potencia, aplicando las técnicas de análisis en estado estacionario.

1.7. Estado del arte

Un grupo de investigadores conformado por MA You-jie y WEN Hu-long sostiene que el comportamiento dinámico del modelo de un sistema de potencia puede comprenderse mejor en términos del punto de bifurcación nodo silla y Hopf (39). Ellos investigan la estructura de dicho sistema de potencia, con respecto a los cambios de las cargas reales y reactivas. A partir de allí, se presentan métodos numéricos para este análisis de bifurcaciones.

Hoy en día se desarrollan nuevos algoritmos para calcular los puntos de bifurcación de la singularidad inducida de las ecuaciones algebro-diferenciales de los sistemas de potencia (2).

Posteriormente (38), se propone un nuevo método de continuación del flujo de potencia para rastrear los puntos de intercambio de restricciones QV en las cual, el voltaje de regulación de los generadores colisionan con los límites de potencia reactiva. Esta metodología se basa en un esquema de predictor corrector para obtener puntos de intercambio de restricciones en sucesión. El problema con este método es que tiene un gran costo computacional. Los resultados demostraron que el citado método puede predecir, cuándo y dónde el generador individual colisiona con el límite Q, bajo las condiciones de carga esperadas, siendo el límite Q el parámetro de continuación.

En (28), se analizan las bifurcaciones inducidas por singularidades (SIB) en ecuaciones algebro-diferenciales y su ocurrencia en sistemas de potencia. Debido a las SIB, un sistema

de potencia puede perder estabilidad a través de la divergencia de sus valores propios hacia infinito. Las SIB, a diferencia de las bifurcaciones Hopf o nodo silla, son típicas en sistemas descritos por DAEs más que en ODEs.

En (15), se presenta un método para mejorar, mediante suposiciones prácticas, la estabilidad de sistemas de potencia sujetos a grandes perturbaciones.

El método propuesto se compone de dos pasos resueltos iterativamente. El primer paso resuelve un problema de control óptimo de bifurcaciones que garantiza la estabilidad de pequeña señal del punto de equilibrio. El control óptimo de bifurcaciones propuesto resuelve las bifurcaciones nodo silla y Hopf. El segundo paso es un análisis de contingencia $N-1$, calculado con simulaciones en el dominio del tiempo. En (24), realizan un estudio comparativo de un sistema de 3 nodos entre SVC y STATCOM, para verificar la habilidad de estos compensadores en un retraso efectivo de las bifurcaciones nodo silla y concluyen que el STATCOM siempre muestra un mejor desempeño que el SVC.

En (19) discuten la comparación entre los dispositivos SVC y STATCOM para el amortiguamiento de oscilaciones inter-áreas, conjuntamente presentan la típica correlación de las oscilaciones electromagnéticas en los sistemas de potencia y bifurcaciones Hopf.

En (3) se presenta un análisis estructural de estabilidad de la tensión de un sistema de energía con la integración de velocidad variable y generadores de inducción de velocidades constantes para las turbinas de viento. Un modelo DAE se ha desarrollado dando lugar a la matriz de flujo de carga final del sistema. La matriz de carga se modificó de manera que sus sub-matrices fila representan diferentes tipos de bus. La descomposición del valor singular de los sub-matrices generadas se utiliza como un indicador de colapso de tensión. La proximidad al colapso de voltaje se controla mediante el seguimiento las bifurcaciones. Las interacciones entre el sistema con los generadores de carga y buses son analizados estructuralmente para el aumento de la energía eólica y las pruebas de carga

En (5) se dan a conocer varios aspectos, en cuanto al análisis de Newton Rhapsion para el flujo de potencia para el sistema de 30 buses IEEE con y sin FACTS en derivación. En este artículo se encontró que ambos dispositivos SVC y STATCOM son capaces de aumentar el perfil de tensión y dar el máximo beneficio para mantener la tensión estabilizada. Además, el ángulo del voltaje del bus y la fase con FACTS en derivación se representan y se comparan con el caso base.

En (16) se establece que debido a la diversidad de la fuente de generación distribuida y su modo de control, el estado de funcionamiento de la red y de la distribución de energía activa es muy complejo. La aplicación de la teoría de bifurcación para la influencia de unas alteraciones de parámetros de perturbación en la estabilidad de la red de distribución de energía activa es intuitiva (tal es el caso del parámetro de carga). La interfaz electrónica entre la fuente de generación distribuida y la red de distribución es sensible a la tensión de la red de distribución de energía activa, por lo que la estabilidad de la tensión es muy importante.

Muchos factores pueden causar inestabilidad del voltaje, el parámetro que puede mantener la estabilidad del sistema eléctrico puede calcularse utilizando el método de análisis de bifurcación, que puede proporcionar referencias útiles para los operadores y diseñadores.

En (31) se determina que una forma de resolver el problema de consumo de potencia reactiva durante la caída de voltaje en los parques eólicos, es mediante el uso de los compensadores dinámicos de potencia reactiva tales como el STATCOM y el SVC, dado que estos dispositivos FACTS son capaces de aportar la potencia reactiva necesaria para evitar la caída abrupta de voltaje y evitar la salida de los servicios de los parques eólicos.

En (26) se hace la aplicación del STATCOM en un parque eólico, dado que la energía eólica tiene una gran perspectiva de crecimiento en la industria eléctrica. El desarrollo de la tecnología en la energía eólica tiene un gran progreso, los grandes parques eólicos y la red de transmisión están directamente conectados, así que la exigencia de la calidad de la energía es muy alta. La energía eólica es un tipo de energía intermitente, y hay algunos errores en la previsión de la velocidad del viento. Así que la energía eólica no puede proporcionar energía estable y la estabilidad de la generación de energía es pobre, la aplicación de STATCOM en el sistema de distribución permite la regulación rápida del voltaje y así poder aportar o absorber la potencia reactiva necesaria a la red eléctrica, también puede mejorar la calidad de la energía considerablemente.

En (23) se hace un uso de soluciones de flujo de potencia consecutivos para encontrar los límites de estabilidad de tensión y márgenes cuando el sistema incluye dispositivos FACTS, se hace un análisis de las condiciones iniciales del sistema y los numerosos riesgos así como la determinación de los nodos críticos en el sistema. El uso del método de continuación de flujo de potencia permite la colocación óptima de STATCOM y SVC en un sistema de eléctrico de potencia, en este artículo se utiliza la matriz jacobiana en el punto de máxima capacidad de carga como un indicador para la determinación de los buses críticos del sistema así como las líneas más cargadas para la instalación de estos dispositivos. Con esto se mejora de la capacidad de transferencia de potencia mediante el uso de estos dispositivos FACTS.

En (29), se aplica el método de continuación en los sistemas de energía para encontrar una serie de soluciones al flujo de potencia a partir de un cierto punto de equilibrio. Esto se logra con un esquema predictor-corrector que incluye un parámetro en las ecuaciones de flujo de potencia, que acciona el sistema de un punto de equilibrio a otro. Cuando el parámetro elegido es la carga, este método nos permite determinar la margen de carga de nuestro sistema.

Estabilidad de tensión

La estabilidad de un sistema de potencia es la capacidad de un sistema eléctrico de potencia, para una condición inicial de operación, de recuperar un estado de equilibrio después de someterse a una perturbación.

2.1. Conceptos sobre estabilidad de tensión

De acuerdo con (22), la estabilidad en sistemas eléctricos de potencia se clasifica en tres grupos principales:

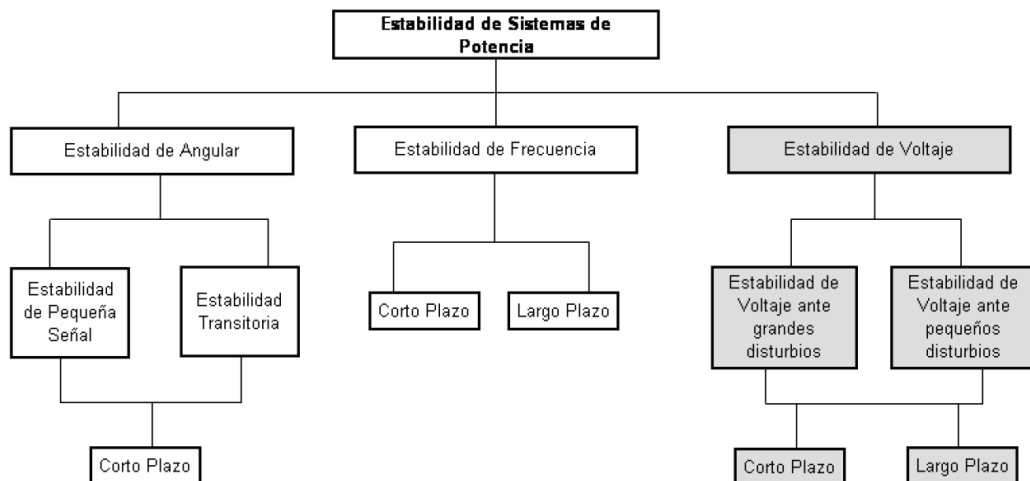


Figura 2.1: Clasificación en Sistemas de Potencia (22).

2. ESTABILIDAD DE TENSIÓN

La estabilidad de angular, se refiere a la capacidad de las máquinas sincrónicas de mantener el sincronismo cuando están sujetas a una perturbación, esto involucra la habilidad de mantener el equilibrio entre el par electromecánico y el par mecánico.

El estudio de la estabilidad de ángulo del rotor involucra el estudio de las oscilaciones electromecánicas (variables mecánicas como velocidad y par; y variables eléctricas como potencia y ángulos eléctricos) que ocurren en el sistema.

La pérdida de sincronismo en un sistema de potencia puede ocurrir entre una máquina y el resto del sistema o entre un grupo de máquinas.

La estabilidad de frecuencia se refiere cuando se satisface el balance de potencia, esto es, cuando la generación total es igual a la demanda del sistema, incluyendo las pérdidas. La inestabilidad de frecuencia se analiza generalmente usando simulaciones en el dominio del tiempo, en las que se plantean escenarios como pérdida de generación o carga.

La estabilidad de voltaje es la capacidad que tiene el sistema de mantener niveles de voltaje aceptables en todos sus buses, cuando opera en condiciones normales y bajo el efecto de una perturbación. La estabilidad de voltaje está relacionada directamente con la capacidad del sistema de suministrar la potencia reactiva requerida, por lo que se dice que un sistema es inestable desde el punto de vista de voltaje cuando al inyectar potencia reactiva en un bus, el nivel de voltaje no aumenta.

Una posible consecuencia de la inestabilidad de voltaje es la desconexión de carga en algunas áreas del sistema o la salida de elementos del sistema eléctrico de potencia, por actuación de las protecciones asociadas a los mismos.

A pesar de que la inestabilidad de voltaje es esencialmente un fenómeno local, las consecuencias del mismo pueden tener un impacto general en el sistema, si no es controlado oportunamente.

La inestabilidad de voltaje puede llevar al sistema al colapso, entendiéndose como colapso bajos niveles de voltaje en los buses y que van en sucesión, es decir el sistema no puede recuperarse y se llega a un apagón.

El colapso de voltaje ocurre típicamente en sistemas de potencia en los cuales han sido fuertemente cargados o tienen deficiencias en la potencia reactiva. El colapso de voltaje es una inestabilidad del sistema en la que se involucran simultáneamente muchos de los componentes del sistema de potencia y sus variables. En efecto, el colapso de voltaje involucra un sistema de potencia completo aunque usualmente tiene mayor efecto en un área particular del sistema de potencia. El colapso de voltaje está asociado con las demandas de potencia reactiva de cargas no adecuadas, debido a las limitaciones en la producción y transmisión de la misma. Las limitaciones en la producción de potencia reactiva incluyen límites en el generador, el SVC de potencia reactiva y la potencia reactiva reducida producida por capacitores a baja tensión. Las limitaciones primarias en la transmisión de potencia reactiva son las altas pérdidas de potencia reactiva sobre las líneas cargadas fuertemente y las salidas de línea. Las demandas de potencia reactiva de las cargas se incrementan con el incremento de las cargas, el atascamiento de los motores o cambios en la composición de la carga tal como una proporción incrementada en la carga de un compresor (7).

La estabilidad de voltaje ante una perturbación severa se refiere a la capacidad del sistema de mantener voltajes estables luego de una perturbación severa, tal como fallas en el sistema, pérdidas de generación o contingencias de corto circuito.

Esta capacidad es determinada por las características del sistema, la carga, y las interacciones de los controles continuos y discretos de protecciones.

La determinación de la estabilidad de voltaje de perturbación severa requiere la revisión de la respuesta no lineal del sistema de potencia durante el tiempo suficiente para capturar el funcionamiento y las interacciones de los dispositivos como los cambiadores de tap de baja carga de los transformadores y los limitadores de campo del generador.

2.2. Cambios en el sistema de potencia que contribuyen al colapso de tensión

Hay varios cambios conocidos en el sistema de potencia que contribuyen al colapso de tensión, entre ellos el incremento en la carga, la acción de cambio de taps en los transformadores, la recuperación de carga, las caídas de la línea o salidas del generador, entre otras.

La mayoría de estos cambios tienen un efecto grande sobre la producción o transmisión de potencia reactiva. Para prevenir el colapso de tensión se deben realizar acciones de control tales como: re-despacho de generación, re-programación de los voltajes del generador y del bus, eliminación de carga, etc.

Para comprender la disminución del voltaje que se produce al aplicar una carga y la inestabilidad que se puede presentar si dicha carga es excesiva, en (7) se analiza el circuito dado en la Figura 2.2.

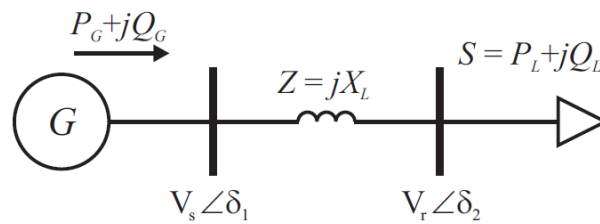


Figura 2.2: Modelo básico de un sistema de potencia

El circuito de la Figura 2.2, presenta un generador conectado a una impedancia Z , con una tensión interna constante V_s que alimenta a una demanda de potencia variable S . La ecuación general que describe el voltaje en la carga V_r es:

2. ESTABILIDAD DE TENSIÓN

$$V_r = V_s - ZI \quad (2.1)$$

Por otro lado, la corriente en la carga I se determina en función de la demanda S

$$I = \frac{S}{V_r} \quad (2.2)$$

El comportamiento de estas ecuaciones es no lineal. Así, al aumentar la demanda, I tiende a aumentar y al mismo tiempo V_r tiende a disminuir.

$$V_r V_r - V_r V_s + SZ = 0 \quad (2.3)$$

Si se asume un factor de potencia constante, se puede graficar V_r versus S , como se observa en la figura 2.3

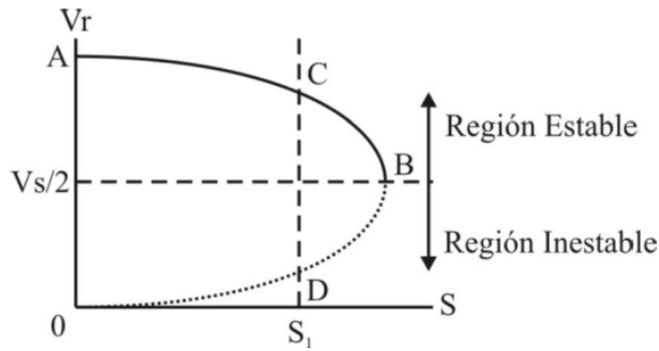


Figura 2.3: Curva de estabilidad de voltaje de estado estacionario.

El punto B o nariz de la parábola, depende del factor de potencia. Si existen cambios en la red, o sea en la impedancia Z , la curva cambiará. En la gráfica anterior se pueden identificar dos zonas:

- De A a B la tensión 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 la estabilidad.
- De B a D se conoce como la zona de inestabilidad de estado estacionario.
- Cuando se encuentra operando el sistema en el punto S_1 y se analiza 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 es posible atender la carga adicional pues se requiere un aumento en el voltaje V_r .

En el problema de colapso de voltaje, la carga juega un papel muy importante y su comportamiento puede afectar la respuesta del sistema.

2.3. Estudio de bifurcaciones en los sistemas eléctricos de potencia

Varios tipos de problemas de estabilidad en sistemas de potencia, tales como el colapso de voltaje y fenómenos oscilatorios, pueden ser analizados a través de la teoría de bifurcaciones (7). El análisis de bifurcación ha sido una herramienta importante para estudiar la estabilidad de tensión en un sistemas de potencia. Esta teoría describe la forma en la cual ocurren cambios cualitativos en el comportamiento de un sistema eléctrico de potencia cuando cambia uno o más parámetros. Por ejemplo, se ha observado que a medida que la carga aumenta a lo largo del día, el sistema tiende a ser más vulnerable a pequeñas contingencias, por ejemplo la apertura de una línea.

Esta teoría se concentra en el estudio de las propiedades de estabilidad de los puntos de equilibrio cuando ciertos parámetros, llamados parámetros de bifurcación, varían lentamente, como por ejemplo la carga en los sistemas eléctricos de potencia. En el caso particular de los problemas de estabilidad de voltaje se ha mostrado que las bifurcaciones que se presentan son del tipo nodo silla, mientras que las oscilaciones de voltaje y de potencia se pueden estudiar como bifurcaciones tipo Hopf

2.3.1. Modelo matemático

En (8) se analiza la estabilidad en sistemas de potencia, generalmente se utilizan modelos matemáticos representados por un sistema de ecuaciones algebro-diferenciales. Es de interés saber como se produce la inestabilidad y en qué punto ocurre. Las ecuaciones algebro-diferenciales usadas para modelar el sistema de potencia son de la forma:

$$\dot{x} = f(x, y, \lambda) \tag{2.4}$$

$$0 = g(x, y, \lambda) \tag{2.5}$$

Donde $x \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estado, $y \in \mathbb{R}^m$ es un vector de variables algebraicas, y $\lambda \in \mathbb{R}$ es cualquier parámetro en el sistema que cambia suavemente, moviendo el sistema a un punto de equilibrio cualquiera. Los puntos equilibrio son todo conjunto de valores x_0, y_0, λ_0 tal que:

$$0 = f(x_0, y_0, \lambda_0) \tag{2.6}$$

$$0 = g(x_0, y_0, \lambda_0) \tag{2.7}$$

2.3.2. Bifurcaciones Nudo Silla (SNB)

Esta bifurcación está asociada con la aparición y desaparición de puntos de equilibrio conforme el parámetro de control es variado. Este proceso se muestra en la Figura 2.4, donde dos puntos de equilibrio se mueven uno hacia otro aniquilándose entre sí.

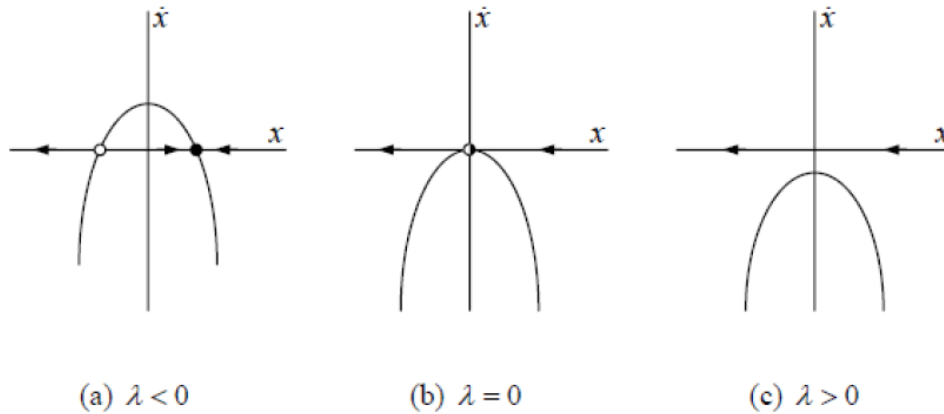


Figura 2.4: Destrucción de los puntos de equilibrio

Si el parámetro de bifurcación λ es menor que cero, existen dos puntos de equilibrio en el sistema, uno estable y otro inestable. Cuando el parámetro es igual a cero, los puntos de equilibrio estable e inestable chocan, y se produce el punto de bifurcación nodo silla. Si el parámetro de control es mayor a cero no existen puntos de equilibrio.

Desde el punto de vista matemático, el proceso que provoca una bifurcación nodo silla se puede explicar de la siguiente manera: Si el parámetro de bifurcación λ es menor que cero, y dependiendo de la condición inicial de las variables de estado, existen diversas soluciones que satisfacen las ecuaciones algebraicas no lineales. En este caso es posible obtener dos puntos de equilibrio en el sistema, uno estable y otro inestable. Cuando el parámetro es igual a cero, el Jacobiano del sistema se vuelve singular; tal que $\det J(x_*) = 0$ y no es posible obtener una solución. Por último, si el parámetro de control es mayor a cero no existen puntos de equilibrio, lo cual implica que el proceso iterativo aplicado para la solución de las ecuaciones algebraicas no lineales nunca convergerá.

Considerando la ecuación diferencial $\dot{x} = -x^2 - \lambda$, el diagrama de bifurcación se muestra en la Figura 2.5. Para un valor del parámetro de bifurcación menor que cero, esta ecuación tiene dos soluciones, una estable y otra inestable. Las soluciones asociadas a puntos de equilibrio estables e inestables obtenidas para diferentes valores de λ son representadas en el diagrama de bifurcación en línea continua gruesa y línea discontinua delgada, respectivamente. Conforme λ tiende a cero, ambas soluciones se aproximan entre sí $\lambda = 0$. En este valor acontece la bifurcación nodo silla. Para valores de mayores de cero, no existe solución alguna del sistema.

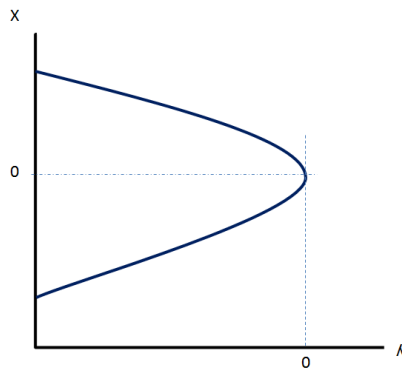


Figura 2.5: Bifurcación nodo silla

Las bifurcaciones nodo silla están caracterizadas por dos puntos de equilibrio, típicamente uno estable y uno inestable. Estos puntos se fusionan en el punto de equilibrio (x_0, y_0) para el valor paramétrico $\lambda = \lambda_0$; este punto de equilibrio tiene un simple y único autovalor cero de $D_x s|_0$ (7), (34). Si los dos puntos de equilibrio se unen coexiste para $\lambda < \lambda_0$, los dos puntos de equilibrio desaparecen localmente para $\lambda > \lambda_0$ y viceversa.

En la Figura 2.6, se ilustra la bifurcación nodo silla. Existen puntos de equilibrio estable sobre la parte superior de la gráfica y puntos de equilibrio inestable en la parte inferior. Es de interés el punto de equilibrio localizado en el origen donde se unen los puntos de equilibrio estable e inestable. Este punto es referido como una bifurcación nodo silla.

Como se ilustra, las bifurcaciones nodo silla son bifurcaciones locales, ocurren en el punto donde el equilibrio desaparece localmente para otros valores del parámetro de bifurcación. Se cumplen las siguientes condiciones para las bifurcaciones nodo silla:

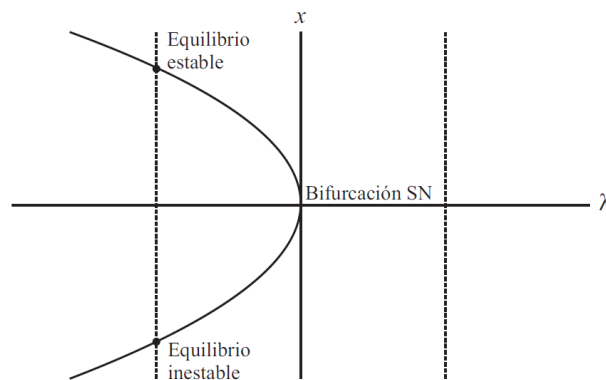


Figura 2.6: Bifurcación nodo silla

- El punto es un punto de equilibrio, es decir $s(x, \lambda) = 0$
- El Jacobiano de la función tiene un autovalor cero.

Finalmente, las bifurcaciones nodo silla son consideradas genéricas, esto es, se espera que ellas ocurran en sistemas de potencia (7). Por ejemplo, si la cargabilidad de un sistema de potencia se modela como el parámetro de bifurcación λ , se podría esperar que ocurrieran bifurcaciones silla nodo para ciertos valores de λ .

2.3.3. Bifurcaciones Hopf

Las bifurcaciones Hopf están relacionadas con sistemas de más de una dimensión. Para sistemas de más de una dimensión, la forma de perder estabilidad cuando un parámetro es variado está relacionada con los valores propios de la matriz Jacobiana. Para que el sistema sea estable existen dos posibilidades, que los valores propios sean reales y negativos o que sean complejos conjugados con parte real negativa. Por el contrario, para que el sistema sea inestable un valor propio real o dos valores propios complejos conjugados deben cruzar el eje imaginario hacia la parte derecha del plano complejo cuando el parámetro de bifurcación sea variado.

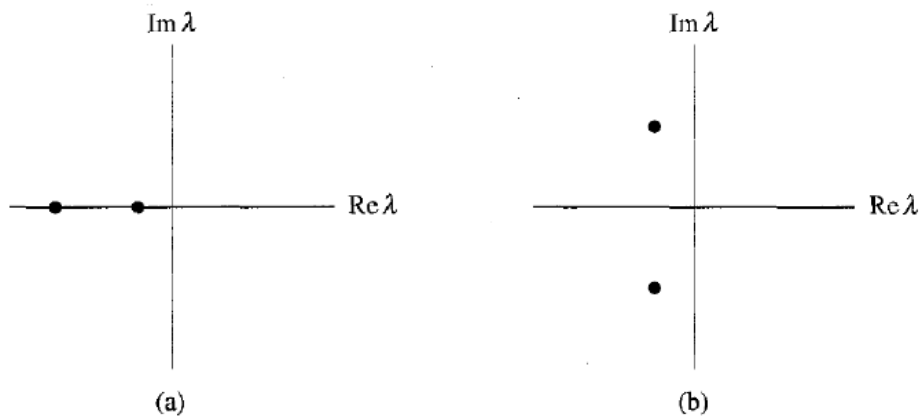


Figura 2.7: Diagrama de valores propios

El último caso, en el que los dos valores propios complejos simultáneamente cruzan este plano complejo es el origen de la bifurcación Hopf.

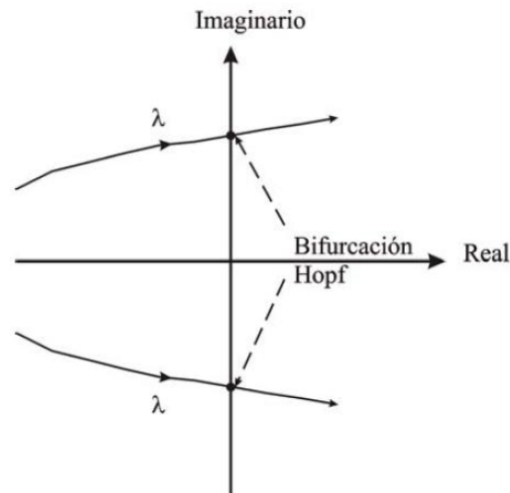


Figura 2.8: Ubicacion de valores propios para una bifurcacion Hopf

Se ha mostrado que las bifurcaciones Hopf existen en varios modelos de sistemas de potencia reales; las bifurcaciones Hopf encontradas en (7), (9) ocurrieron cerca al “codo” de la curva PV. Por lo tanto, si una bifurcación Hopf ocurre en un sistema de potencia, un pequeño incremento de la carga en este punto podría hacer que el sistema llegara a ser inestable. Esto indica que las oscilaciones asociadas con las bifurcaciones Hopf en los sistemas de potencia son un preaviso para indicar que el sistema puede llegar a colapso de tensión. Las bifurcaciones Hopf no conducen a ningún cambio en el número de puntos de equilibrio. Ese tipo de bifurcaciones está caracterizado por un par de autovalores complejos conjugados, para el punto de equilibrio (x_0, y_0, λ_0) , situados en el eje imaginario del plano complejo, así la bifurcación Hopf establece el origen de una familia de soluciones periódicas en la vecindad de λ_c . Cuando el parámetro λ cambia, el par conjugado complejo se aleja del eje imaginario, o bien a la derecha o a la izquierda.

2.4. Métodos de análisis de estabilidad de tensión

Uno de los objetivos de la estabilidad de voltaje, es encontrar que tan cerca está el sistema al punto de colapso, el cual puede ser determinado en función de la carga y reserva de potencia reactiva, entre otros. La importancia de buscar el punto de inestabilidad es la determinación del margen de cargabilidad del sistema, lo que conlleva a determinar las medidas preventivas que se deberían tomar para evitar que el fenómeno del colapso ocurra y el espacio de tiempo en el que se deberían considerar estas medidas.

El análisis de estabilidad de voltaje, se puede hacer usando las herramientas para el análisis dinámico o estático, la elección se basa en los objetivos planteados en el estudio, velocidad de cálculo computacional, entre otros. A continuación se presenta una descripción de cada una de estas herramientas de análisis a considerar:

- **Análisis Dinámico.**

El análisis dinámico busca determinar la cronología de los eventos que llevan a la inestabilidad de voltaje, la resolución matemática es a través de ecuaciones diferenciales y usa simulaciones en el dominio del tiempo. Estas simulaciones se usan para estudiar casos específicos de eventos que provocan el colapso, para analizar los sistemas de protecciones y de control del sistema eléctrico de potencia.

- **Análisis Estático.**

El análisis estático se utiliza para determinar límites y localización de áreas problemáticas, éste utiliza ecuaciones algebraicas para representar las condiciones del sistema. Algunas metodologías utilizadas para este análisis son:

- Análisis de Flujos de Potencia.
- Análisis de Sensibilidad V-Q.
- Análisis Modal.
- Curvas PV.
- Curvas QV.
- Entre otros...

Los criterios de estabilidad de voltaje generalmente son especificados en términos de los márgenes de potencia real y reactiva. Estos márgenes de seguridad de cada región o área debe cumplirlos tomando en cuenta algunas incertidumbres como: crecimientos inesperados en la proyección de la demanda, variaciones en los despachos de generación de áreas vecinas, etc.

2.4.1. Flujos de potencia

Son flujos de potencia estáticos que representan la variación de los voltajes en los nodos del sistema con respecto al cambio de la potencia de la carga. Esta técnica calcula los estados,

límites y márgenes de estabilidad de voltaje en el sistema de potencia, para el estado normal de operación y después de contingencias.

Sus resultados se utilizan para graficar el voltaje contra la potencia y calcular los límites de carga, márgenes de cargabilidad, índices de proximidad a la inestabilidad e identificación de las áreas, nodos o elementos débiles del sistema.

Algunas técnicas desarrolladas para los métodos de flujos convencionales son: análisis de sensibilidad, análisis por equivalentes de red, singularidad de la matriz Jacobiana, diferencia vectorial y técnicas basadas en energía, entre otras.

El análisis de sensibilidad VQ se basa en el análisis de la variación del voltaje con respecto a la potencia, para determinar los márgenes y límites de estabilidad de voltaje, así como las áreas y zonas más sensibles del sistema.

En 1983 se analizó la sensibilidad del voltaje con respecto a la potencia reactiva de un nodo de carga, $\partial V/\partial Q$ (4). En 1990 se midió la distancia al colapso con matrices de sensibilidad de voltaje en los nodos y la variación de reactivos de la carga hasta el límite ΔQ_i (14). En 1991 se analizó la sensibilidad del voltaje ante el cambio de potencia activa $\partial V/\partial P$ y la potencia reactiva $\partial V/\partial Q$, y se definió un índice de proximidad al colapso de voltaje para cada nodo.

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

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q \quad (2.8)$$

donde:

- ΔV Cambio en el incremento de la magnitud del voltaje en un nodo (Vector).
- ΔQ Cambio en el incremento de la inyección de potencia reactiva (Vector).
- J_R Matriz Jacobiana reducida.

Los elementos de la matriz Jacobiana reducida inversa J_R^{-1} representan las sensibilidades V-Q.

Los componentes de la diagonal representan las sensibilidades propias $\partial V_i / \partial Q_i$ lo que indica la sensibilidad del nodo con el respecto a él mismo y los elementos fuera de la diagonal representan las sensibilidades mutuas $\partial V_k / \partial Q_i$ que quiere decir la sensibilidad del nodo con respecto al sistema. Las sensibilidades de los nodos controlados por voltaje son iguales a cero. Para una interpretación adecuada del análisis de sensibilidad cabe aclarar lo siguiente.

- Sensibilidad positiva: Indica que el sistema es estable, un valor pequeño de sensibilidad indica que el sistema es más estable, lo que conlleva a que a medida que la estabilidad disminuye la sensibilidad aumenta.

- **Sensibilidad Negativa:** Indica que el sistema es inestable, debido a que ante aumentos en la inyección de potencia reactiva los niveles de voltaje caen en el sistema. Se dice que el sistema no es controlable porque los dispositivos de control están diseñados para reaccionar con un incremento en V después de realizarse un incremento en Q .

2.4.2. Curvas P-V

Las curvas P-V son muy útiles para un análisis conceptual de la estabilidad de voltaje y para el estudio de sistemas radiales. Este método es también utilizado para grandes redes malladas donde P es la carga total en un área y V es el voltaje en un bus crítico o representativo. P puede ser también la potencia de transferencia a través de una línea de enlace o de interconexión. En estas curvas es posible graficar el voltaje en varios buses.

Una desventaja en este tipo de curvas es que la simulación de flujos de potencia va a divergir en el punto cercano a la nariz o máximo punto de potencia sobre la curva. Otra desventaja es el hecho de que conforme la carga del área se va incrementando, la generación tiene que ser re-despachada considerando despachos reales de generación.

2.4.3. Análisis P-V

A continuación se describen algunos lineamientos para realizar el análisis P-V de un sistema. Como se mencionó anteriormente, el análisis P-V es una herramienta de estado estable que desarrolla una curva la cual relaciona el voltaje en uno o más nodos, con la carga en un área o el flujo a través de un enlace. Los voltajes de los nodos son monitoreados a lo largo de un rango de incrementos de carga y de flujos de potencia activa dentro de una región. Uno de los beneficios más importantes de esta metodología, es que proporciona una indicación directa de la proximidad al colapso de voltaje a lo largo de un rango de niveles de carga o flujos en enlaces para la topología del sistema simulado. Los aspectos específicos del planteamiento del o los casos a simular, así como herramientas de estudio y teoría son responsabilidad del ingeniero que efectúa el análisis.

La naturaleza del colapso de voltaje es que conforme se incrementa la transferencia de potencia hacia alguna región de carga específica, el perfil de voltaje de esa región tenderá a deteriorarse y deteriorarse hasta un punto donde se alcance el colapso de voltaje. Los voltajes en nodos específicos de la región pueden variar significativamente y algunos de estos voltajes de nodo pueden parecer aceptables. Sin embargo, el punto de colapso de voltaje en todos los nodos de la región de estudio, ocurrirá en el mismo nivel de importación de potencia, independientemente de los voltajes en esos nodos específicos.

Las áreas susceptibles a problemas de colapso de voltaje pueden ser identificadas mediante un análisis de contingencias de flujos de potencia. Aquellos casos que no tienen convergencia o que presentan grandes desviaciones de voltaje post-disturbio, están típicamente dentro o muy cerca del punto de inestabilidad de voltaje respectivamente.

En caso de que el programa de flujos de potencia utilizado tenga la posibilidad de poder monitorear $\Delta V/\Delta Q$ de la matriz Jacobiana durante la generación de la curva P-V, estas magnitudes pueden proporcionar valiosa información sobre los nodos donde el colapso de voltaje iniciará. El nodo que tiene la mayor relación de cambio de $\Delta V/\Delta Q$ antes del colapso (nariz de la curva), es el nodo más débil; por otro lado, el modelo de potencia constante para la carga del sistema es el que típicamente representa el colapso de voltaje más crítico en un análisis P-V.

2.4.4. Generación de las curvas P-V

En esta sección se describe el procedimiento a seguir para desarrollar una curva P-V.

1. Se elige una región de estudio en la cual se irá incrementando gradualmente la carga. Esta región es generalmente una parte del sistema en la que se espera o se conoce que puede ser susceptible a presentar problemas de colapso de voltaje y puede ser tan pequeña o grande como sea necesario. Las variables que se irán modificando son, la carga interna de la región de estudio a un factor de potencia constante.
2. Ajustar la generación interna del área de estudio a un nivel constante(sin variación) de las unidades en línea. Dicho de otra manera, la salida de potencia activa de los generadores internos debe permanecer sin cambios durante el análisis P-V. Por su parte, sí es permitido que la salida de potencia reactiva de las unidades generadoras se vaya ajustando conforme se va formando la curva P-V. De esta forma, el colapso de voltaje ocurrirá en la región de estudio después de que la capacidad de potencia reactiva de sus generadores sea rebasada.
3. Elegir el nodo o nodos del área de estudio en los cuales se observará el voltaje conforme la transferencia de potencia hacia el área mencionada se incremente. En este aspecto, el elegir los nodos adecuados a monitorear es una investigación previa que el ingeniero analista debe realizar. Los voltajes monitoreados son los datos del eje y de la curva P-V.
4. Elegir la condición operativa a simular del sistema. Esta condición del sistema debe ser representada antes de que las cargas internas y la generación externa sean escaladas para desarrollar la curva P-V.
5. Resolver el caso inicial de flujos de potencia partiendo de un nivel bajo de carga o de un flujo en el enlace.
6. Hacer un reporte de los voltajes de los nodos monitoreados y el nivel de carga o de la transferencia de potencia para los cuales se resolvió el caso de flujos.
7. Los resultados del análisis P-V pueden indicar que en el punto de colapso, el perfil de voltaje de una región es significativamente mas bajo que el mínimo permitido para condiciones operativas aceptables.

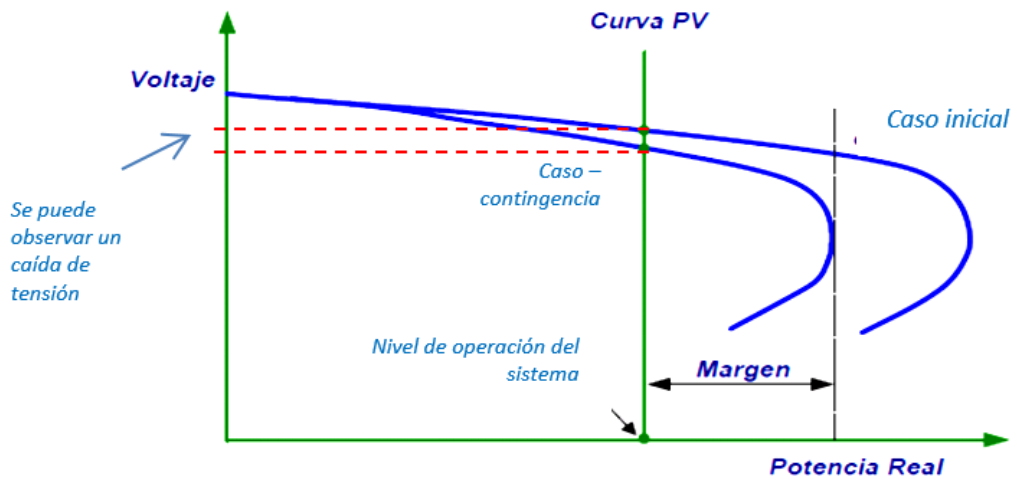


Figura 2.9: Curvas PV

Modelo del Sistema Eléctrico y dispositivos

FACTS

3.1. Sistema Eléctrico de Potencia

El propósito general de un sistema eléctrico de potencia, es satisfacer continuamente la potencia eléctrica requerida por los consumidores. Existen varias restricciones que deben cumplirse al proporcionar el servicio:

- Los niveles de voltaje y frecuencia deben mantenerse dentro de cierta tolerancia.
- Las líneas de transmisión no deben operar cerca de sus límites térmicos y de estabilidad
- El suministro debe ser confiable y con el menor costo.

Para analizar el comportamiento del sistema eléctrico de potencia bajo las condiciones anteriores, se plantea lo siguiente:

Dadas las inyecciones de potencia activa y reactiva en los nodos de la red, encontrar las condiciones eléctricas en estado estable del sistema eléctrico de potencia. Este análisis es conocido como Análisis de Flujos de Potencia.

3.1.1. Consideraciones y Restricciones

Los estudios de flujos de potencia son de gran importancia en la planeación y diseño de la expansión futura de los sistemas eléctricos de potencia, así como también en la determinación de las mejores condiciones de operación de los sistemas existentes.

3. MODELO DEL SISTEMA ELÉCTRICO Y DISPOSITIVOS FACTS

La información principal que se obtiene de un estudio de flujos de potencia es la magnitud y el ángulo de fase de cada nodo y la potencia activa y reactiva que fluyen en cada línea de transmisión.

Para el análisis de flujos de potencia, la red eléctrica es modelada por: un conjunto de nodos interconectados por medio de líneas de transmisión y transformadores, además se tienen generadores y cargas conectadas a varios nodos del sistema, los cuales inyectan o toman potencia compleja de la red eléctrica.

Se asume que las cargas en el sistema son constantes, esto va de acuerdo con la naturaleza de la demanda de los consumidores, la cual varía generalmente de forma lenta.

El modelo usado en el análisis de flujos de potencia es apropiado para solucionar voltajes y flujos de potencia en estado estable. Sin embargo, en el problema de flujos de potencia al estar definida la potencia como el producto de voltaje por la corriente, la formulación del problema es no lineal.

Dado que el problema de flujos de potencia consiste en el cálculo de los voltajes nodales y los flujos de potencia en las líneas de transmisión, para cada nodo del sistema se requiere conocer cuatro variables:

- Potencia activa P .
- Potencia reactiva Q .
- Magnitud de voltaje V .
- Ángulo de fase de voltaje δ .

Analizando los nodos de un sistema de potencia podemos observar que en general existen dos tipos de nodos: de generación y de carga. Los nodos de interconexión son considerados nodos de carga con valor de P y Q igual a cero.

En los nodos de generación la P inyectada a él, determinado por el gobernador de la turbina, es siempre conocida. La magnitud de voltaje, V , es mantenida constante por medio de una inyección de potencia reactiva. El regulador automático de voltaje actúa sobre la excitación del generador, variando la inyección de potencia reactiva. Estos nodos son los que contienen compensadores estáticos de vars (SVC) o compensadores síncronos rotatorios. En general estos nodos son denominados nodos de voltaje controlado.

Los nodos de carga o nodos de voltaje no controlado, son aquellos donde la inyección de potencia $P + jQ$ es especificada. Tanto P como Q se asumen que son constantes.

Al efectuar un estudio de flujo de potencia, las pérdidas de potencia activa y reactiva en la red no son conocidas de antemano. Esto significa que el total de potencia inyectada, generación, no puede ser especificada. Por este motivo la inyección de potencia activa y reactiva de al menos un nodo debe ser determinada por la solución; el nodo que asume esta función es llamado nodo Slack.

En un sistema de potencia real, este nodo corresponde a la planta generadora que tiene la responsabilidad del control de frecuencia. Como el nodo slack es de voltaje controlado y generador, también usualmente se le asigna la referencia de fase del sistema, por tanto, el voltaje complejo en este nodo debe ser especificado y las variables desconocidas serán la potencia activa y reactiva. Todos los nodos de voltaje controlado se comportan como compensadores de potencia reactiva, ya que para mantener el voltaje en su valor especificado, modifican su generación de potencia reactiva.

Tipos de Nodo	VARIABLES CONOCIDAS	VARIABLES DESCONOCIDAS
Voltaje Controlado	P, V	Q, δ
Carga	P, Q	V, δ
Slack	V, δ	P, Q

Tabla 3.1: Tipos de Nodos

3.1.2. Modelo del Sistema Eléctrico de Potencia

Para obtener la formulación básica del sistema en estado estacionario, se escriben las ecuaciones de balance de potencia, donde la suma de potencia en un nodo debe ser cero; por lo tanto, al hacer un análisis entre la carga y la generación tenemos lo siguiente:

$$\Delta P = P_{Gk} - P_{Lk} - P_k^{cal} = P_k^{sch} - P_k^{cal} = 0 \quad (3.1)$$

$$\Delta Q = Q_{Gk} - Q_{Lk} - Q_k^{cal} = Q_k^{sch} - Q_k^{cal} = 0 \quad (3.2)$$

donde:

- ΔP y ΔQ son las ecuaciones de Mismatch de potencia activa y reactiva en el bus k .
- P_{Gk} : Potencia Activa inyectada por el generador al bus k .
- Q_{Gk} : Potencia Reactiva inyectada por el generador al bus k .
- P_{Lk} : Potencia Activa de la carga al bus k .
- Q_{Lk} : Potencia Reactiva de la carga al bus k .
- P_k^{cal} : Potencia Activa calculada en el bus k .
- Q_k^{cal} : Potencia Reactiva calculada en el bus k .

$$P_k^{sch} = P_{Gk} - P_{Lk} \quad (3.3)$$

$$Q_k^{sch} = Q_{Gk} - Q_{Lk} \quad (3.4)$$

P^{sch} y Q^{sch} son las potencias programadas para el sistema.

Si consideramos los parámetros de la línea de transmisión podemos determinar las ecuaciones que nos permiten conocer los flujos de potencia en el sistema.

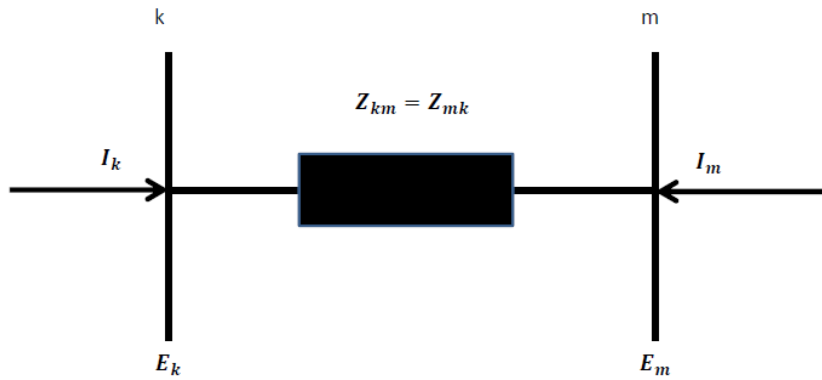


Figura 3.1: Línea de Transmisión

Haciendo un análisis de la línea de transmisión, y al tener una impedancia equivalente, tenemos que:

$$I_k = 1/Z_{km}(E_k - E_m) = Y_{km}(E_k - E_m) \quad (3.5)$$

$$I_m = 1/Z_{mk}(E_m - E_k) = Y_{mk}(E_m - E_k) \quad (3.6)$$

En su forma matricial tenemos que:

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{km} & -Y_{km} \\ -Y_{mk} & Y_{mk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_k \\ E_m \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Si las admitancias y los voltajes se escriben en su forma más explícita, tenemos lo siguiente:

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (3.8)$$

$$E = V_i e^{j\theta_i} = V_i(\cos\theta_i + j\sin\theta_i) \quad (3.9)$$

La potencia compleja inyectada en el bus k consiste en potencia activa y reactiva, y esta puede ser expresada como un voltaje de nodo y una inyección de corriente al nodo.

$$S_k = P_k + jQ_k = E_k I_k^* \quad (3.10)$$

$$S_k = E_k (Y_{kk} E_k + Y_{km} E_m)^* \quad (3.11)$$

Haciendo una sustitución podemos encontrar las potencias calculadas inyectadas al bus k .

$$P_k^{cal} = V_k^2 G_{kk} + V_k V_m [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)] \quad (3.12)$$

$$Q_k^{cal} = -V_k^2 B_{kk} + V_k V_m [G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)] \quad (3.13)$$

Sustituyendo en las ecuaciones de Mismatch.

$$\Delta P_k = P_{Gk} - P_{Lk} - [V_k^2 G_{kk} + V_k V_m [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)]] \quad (3.14)$$

$$\Delta Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk} - [-V_k^2 B_{kk} + V_k V_m [G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)]] \quad (3.15)$$

Estas son las ecuaciones que deben plantearse y resolverse para cada nodo del sistema.

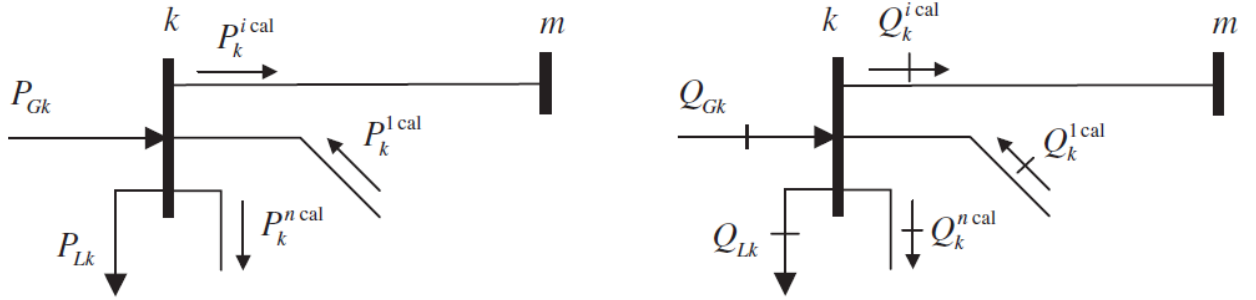


Figura 3.2: Balance de potencia

En términos generales, las ecuaciones que determinan el balance de potencia son:

$$\Delta P_k = P_{Gk} - P_{Lk} - \sum_{i=1}^n P_k^{i cal} = 0 \quad (3.16)$$

$$\Delta Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk} - \sum_{i=1}^n Q_k^{i cal} = 0 \quad (3.17)$$

El método de Newton-Raphson requiere la formación de un conjunto de ecuaciones lineales que expresan la relación de la variación de las componentes de la potencia respecto a los componentes de los voltajes nodales, donde la matriz de coeficientes se denomina como Jacobiana.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_k}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta P_k}{\partial \theta_k} \\ \frac{\partial \Delta Q_k}{\partial V_k} & \frac{\partial \Delta Q_k}{\partial \theta_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_k \\ \Delta \theta_k \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_k \\ \Delta \theta_k \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

3.2. Compensador Estático de Var's.

Los compensadores estáticos de var's (*SVC, Static Vars Compensator*) o CEV son dispositivos con la capacidad de regular su absorción o generación de potencia reactiva, modificando su susceptancia, para controlar el voltaje en un nodo específico.

Estos dispositivos son muy rápidos en su operación y muy adecuados para mejorar la estabilidad del sistema. Están compuestos por capacitores y/o reactores, regulador de voltaje y lógica de control para el disparo de tiristores.

Las funciones más relevantes de la aplicación de SVC en sistemas eléctricos son:

- Mejorar la cargabilidad
- Mejorar la estabilidad transitoria
- Mejorar la estabilidad dinámica

3.2.1. Característica de Operación del Compensador Estático de Var's.

La característica de control de voltaje de un compensador estático puede ser definida en forma total mediante su curva de operación. Para cualquier tipo de estrategia de control, su característica de operación se representa por una parte o toda la curva, similar a la que se muestra en la Figura 3.3. En forma generalizada, la curva característica consta de tres zonas o rangos de control, a saber:

- a) Una zona lineal de operación definida por el esquema de control del compensador. El voltaje en terminales del SVC es regulado entre sus límites mínimo y máximo de operación $V_{t_{min}}$ y $V_{t_{max}}$.
- b) Una zona de operación de bajo voltaje, en la cual el compensador opera en su límite mínimo de control, perdiendo así su capacidad como elemento de regulación de voltaje. En esta zona visto desde el sistema de potencia, la operación del SVC estará determinada por la capacidad nominal de su rama capacitiva, con el voltaje en terminales variando entre cero y $V_{t_{min}}$, de acuerdo a las condiciones del sistema de potencia.

- c) Una zona de operación de sobrevoltaje, en esta zona el compensador opera en su valor máximo de control, surgiendo una característica de variación de voltaje en terminales del SVC, correspondiente al de un reactor fijo con una capacidad nominal igual a la rama inductiva del SVC.

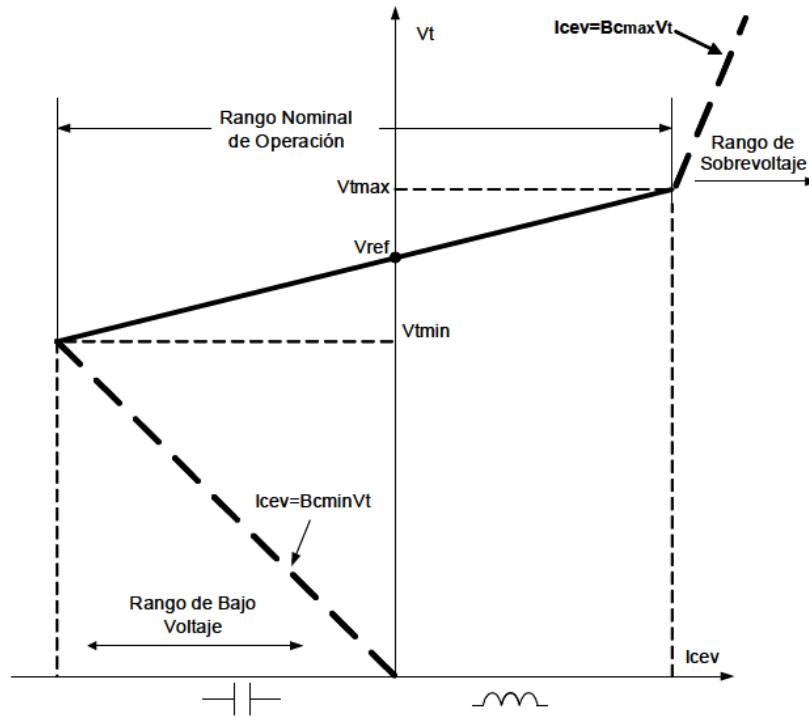


Figura 3.3: Característica en estado estable de un SVC

Dentro de su rango nominal de operación, la característica de regulación de voltaje del SVC corresponde a la de una curva lineal definida por sus dos principales parámetros de control en estado estable, esto es, una pendiente ajustable comúnmente en base al valor de una ganancia y un voltaje variable de referencia V_{ref} .

En forma analítica, la característica de regulación de voltaje del compensador en su rango nominal de operación se expresa mediante la relación:

$$V_t = V_{ref} + m I_{svc} \quad (3.20)$$

donde, m representa la pendiente de la curva característica I_{svc} satisface las restricciones $I_{svc_{min}} < I_{svc} < I_{svc_{max}}$.

$I_{svc_{min}}$ e $I_{svc_{max}}$ representan, respectivamente, las capacidades nominales de inyección de corriente en las ramas capacitiva e inductiva del compensador.

Fuera de su rango nominal de control, la operación del SVC es también posible, si bien es limitada por el rango considerado deseable de regulación de voltaje. Por ejemplo en la zona de bajo voltaje la operación del compensador quedará limitada al valor mínimo recomendado de tensión $V_{t_{min}}$. En la zona de sobrevoltaje, sin embargo, la operación del compensador por periodos prolongados de tiempo provoca daños en el aislamiento del equipo.

En general, solamente la operación del compensador dentro de su rango nominal de control representa una característica deseable de regulación de voltaje, considerándose las otras dos, como modos degradados de operación.

El SVC es un elemento cuya susceptancia se modifica de acuerdo al voltaje del nodo controlado. Las siguientes dos técnicas son usadas para obtener la susceptancia variable:

- Capacitores conectados por tiristores (Figura 3.4. a)
- Reactor controlado por tiristores (Figura 3.4. b)

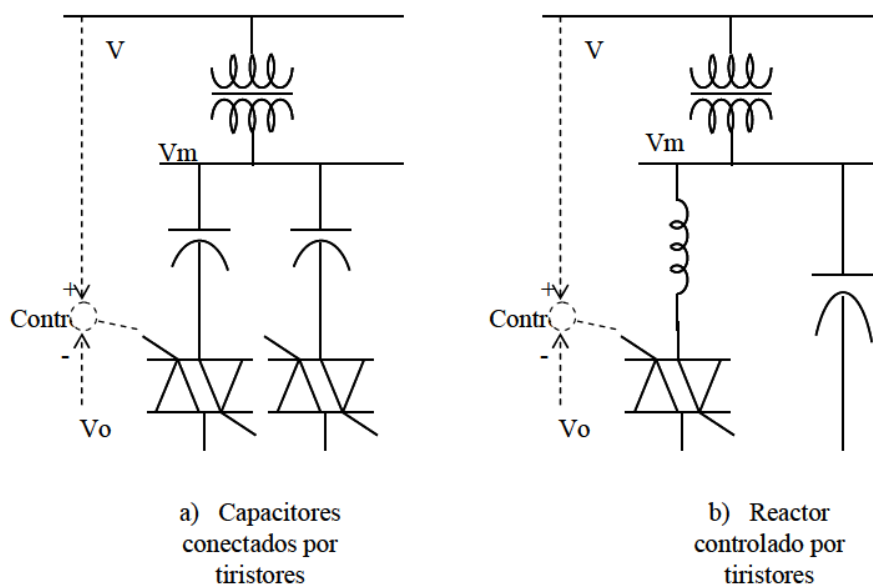


Figura 3.4: Representación esquemática del SVC

Los SVC están prácticamente constituidos por reactores controlados por tiristores (TCR) y por capacitores conmutados por tiristores (TSC), los compensadores en el Sistema eléctrico de potencia están conectados en serie o en paralelo, que incluye un regulador de voltaje y una lógica de control para operación de tiristores. La conexión / desconexión de los capacitores se realiza en forma discreta. La conexión de los reactores se efectúa de forma controlada variando el ángulo de disparo de los tiristores logrando de esta forma el control continuo de la corriente en el reactor (17).

La designación de estático proviene del uso de tiristores aprovechando sus características de conducción en la electrónica de potencia y que son aplicados a los sistemas eléctricos para el control de conexión de reactores y capacitores.

3.2.2. Modelo del SVC

En (17) se demuestra que el Compensador es un dispositivo regulador de la tensión el cual genera o absorbe potencia reactiva al variar la susceptancia equivalente. En la práctica el SVC se considera como una reactancia ajustable con valores límites del ángulo de disparo o límites de la reactancia.

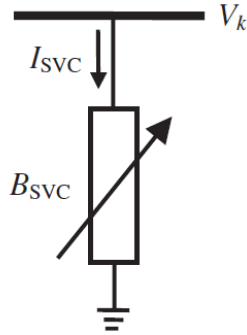


Figura 3.5: Modelo de susceptancia variable del SVC

En (17) y (13) se hace un análisis a la Figura 3.5 en el cual se plantea el modelo del SVC:

$$I_{svc} = jB_{svc}V_k \quad (3.21)$$

donde:

$$B_{svc} = B_c - B_{TCR} \quad (3.22)$$

- B_{svc} : Es la susceptancia del SVC.
- B_{TCR} : Es la susceptancia del reactor controlado a tiristores.
- B_c : Es la susceptancia del capacitor.

La potencia reactiva del SVC, que además es la potencia reactiva inyectada al nodo k está representada por:

$$Q_{SVC} = Q_k = -V_k^2 B_{SVC} \quad (3.23)$$

3. MODELO DEL SISTEMA ELÉCTRICO Y DISPOSITIVOS FACTS

La ecuación linealizada está dada por la siguiente ecuación donde la susceptancia equivalente B_{SVC} ahora es una variable de estado.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}^{(i)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta P_k}{\partial V_k} \\ \frac{\partial \Delta Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta Q_k}{\partial V_k} \end{bmatrix}^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \end{bmatrix}^{(i)} \quad (3.24)$$

dado que:

$$\frac{\partial \Delta Q_k}{\partial B_{svc}} = -V_k^2 \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial \Delta Q_k}{\partial B_{svc}} * B_{svc} = -V_k^2 * B_{svc} \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial \Delta Q_k}{\partial B_{svc}} * B_{svc} = Q_k \quad (3.27)$$

entonces:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}^{(i)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta P_k}{\partial B_{svc}} * B_{svc} \\ \frac{\partial \Delta Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \Delta Q_k}{\partial B_{svc}} * B_{svc} \end{bmatrix}^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \frac{\Delta B_{svc}}{B_{svc}} \end{bmatrix}^{(i)} \quad (3.28)$$

Al final de la iteración (i) , la susceptancia variable shunt B_{SVC} es actualizada de acuerdo a:

$$B_{SVC}^{(i)} = B_{SVC}^{(i-1)} + \left(\frac{\Delta B_{SVC}}{B_{SVC}} \right)^{(i)} B_{SVC}^{(i-1)} \quad (3.29)$$

La susceptancia variable representa la susceptancia total del SVC necesaria para mantener el valor de la tensión nodal en el valor requerido.

3.3. Compensador Estático Síncrono

Después de la aparición de los convertidores electrónicos de alta potencia basados en GTOs, es posible generar o absorber potencia reactiva sin el uso de bancos de capacitores o inductores. Esto condujo al desarrollo y la aplicación de la nueva generación de dispositivos FACTS. El Compensador Estático de Reactivos (SVC) se ha utilizado ampliamente para la regulación del voltaje en sistemas de potencia, mediante el control de la inyección de potencia reactiva.

Se define al Compensador Estático Síncrono (*SSC, Static Synchronous Compensator*) o STATCOM como un generador estático síncrono operado como un compensador estático de var's, en conexión paralelo en el cual la corriente de salida, ya sea inductiva o capacitiva, puede ser controlada de forma independiente del sistema.

Se considera al STATCOM como un dispositivo conformado por un transformador asociado a una fuente conmutada de voltaje (*VSC, Voltage Source Converter*) cuya entrada es una señal de voltaje de CD y a la salida una señal de CA, la señal está en fase y acoplada a la correspondiente señal de CA del sistema y donde está representa un valor relativamente pequeño de reactancia debida a los reactores y al acoplamiento magnético. La señal de salida puede ser variada para controlar parámetros especificados de un sistema eléctrico de potencia. El voltaje de CD necesario para la operación del STATCOM será suministrado por un capacitor capaz de almacenar la energía necesaria

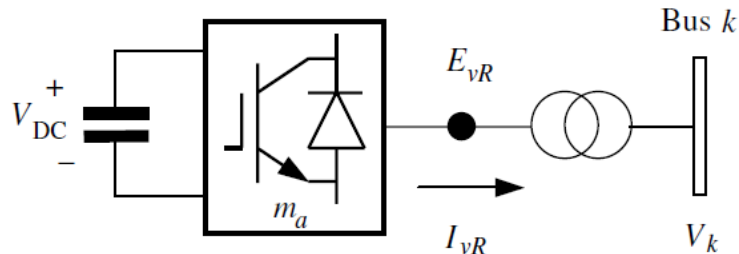


Figura 3.6: Sistema del STATCOM.

El compensador estático síncrono está compuesto por elementos de estado sólido, por lo que no tiene inercia, lo cual representa una gran ventaja, dado que proporciona una respuesta prácticamente inmediata.

3.3.1. Características de Operación del Compensador Estático Síncrono.

En la Figura 3.7 se muestra la curva característica V-I de operación del SSC. En ella se observa como el STATCOM puede suministrar una compensación de tipo capacitivo e inductiva, el compensador puede controlar independientemente las salidas de corriente, también se puede

observar que el STATCOM puede ser operado por encima del rango de corriente de salida tanto en la región de operación inductiva como capacitiva, aún en sistemas de niveles de voltaje muy bajos.

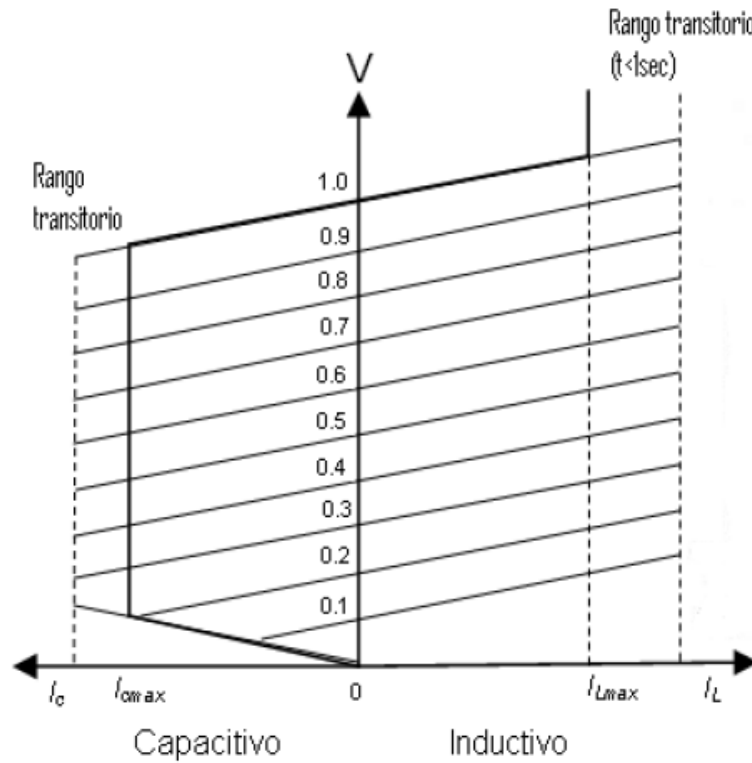


Figura 3.7: Curva característica V-I del STATCOM

La máxima sobre corriente transitoria alcanzable por el compensador en la región capacitiva está determinada por la capacidad de corriente máxima de apagado de los semiconductores de potencia, en cambio, en la región de operación inductiva el rango de valores de corriente transitoria del STATCOM está teóricamente limitado solamente por las temperaturas de juntura de los semiconductores.

La curva característica V-I del STATCOM permite observar otra ventaja de esta tecnología, ya que el compensador es capaz de entregar una salida completa de generación capacitiva casi independientemente del voltaje del sistema, es decir el STATCOM produce una salida de corriente capacitiva alta y constante aun cuando se tenga un voltaje bajo del sistema. Esta capacidad es muy útil en situaciones en donde el STATCOM es empleado para soportar el voltaje del sistema durante y después de una falla. Una ventaja adicional del compensador es que el intercambio de potencia tanto activa como reactiva entre el STATCOM y el sistema de CA puede ser controlado independientemente uno de otro(17), (30).

En la Figura 3.8 se muestra la característica de operación V-Q del STATCOM, en la cual se puede distinguir como es que también se presentan rangos de operación para transitorios, además de contar con una respuesta casi inmediata.

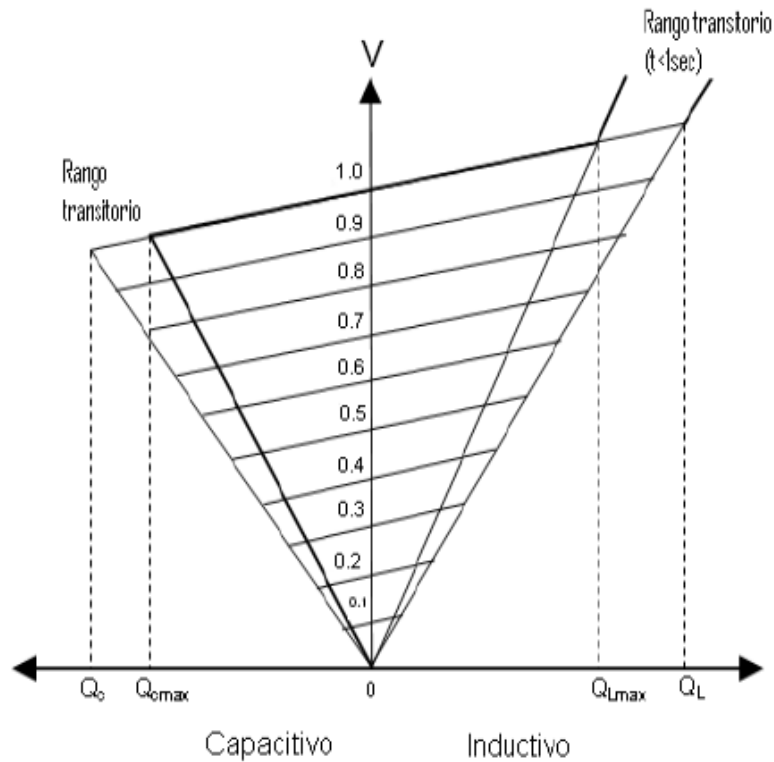


Figura 3.8: Curva característica V-Q del STATCOM

El compensador estático es capaz de proporcionar una salida reactiva linealmente decreciente con la tensión del sistema.

Cuando el STATCOM es instalado dentro de un sistema de potencia, puede mejorar el funcionamiento del mismo en las siguientes áreas:

- El control de voltaje dinámico en sistemas de distribución y transmisión.
- El amortiguamiento de las oscilaciones en los sistemas de trasmisión.
- La estabilidad transitoria.
- El control de pequeñas caídas de voltaje.
- El control, no solo de potencia reactiva, si es necesario también podrá inyectar potencia activa en la línea donde se encuentra conectado.

Además el STATCOM:

- Físicamente ocupa un menor espacio compuesto por elementos electrónicos mas compactos.
- Utiliza compactos módulos electrónicos encapsulados, minimizando el impacto ambiental.

3.3.2. Modelo del STATCOM

A diferencia del SVC, el STATCOM se representa como una fuente de tensión para un rango completo de operación, lo que permite un mecanismo de soporte de tensión más robusto (17), (30), (13)

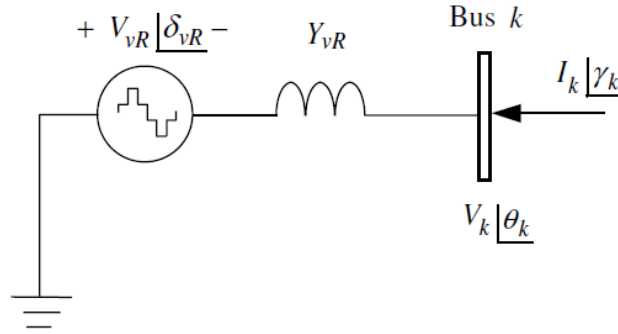


Figura 3.9: Circuito equivalente del STATCOM

Las ecuaciones de flujo de potencia para el STATCOM asumiendo la representación de una fuente de voltaje conectada en paralelo son las siguientes:

$$E_{vR} = V_{vR}(\cos\delta_{vR} + j\sin\delta_{vR}) \quad (3.30)$$

$$S_{vR} = V_{vR}I_{vR}^* = V_{vR}Y_{vR}^*(V_{vR}^* - V_k^*) \quad (3.31)$$

donde:

- E_{vR} : Es la fuente de tensión.
- V_{vR} : Es el voltaje de la fuente.
- δ_{vR} : Es el ángulo de la fuente.
- S_{vR} : Es la potencia de la fuente.
- I_{vR} : Es la corriente de la fuente.
- Y_{vR} : Es la admitancia de la fuente.

- V_k : Es el voltaje en el bus k .

Las ecuaciones que determinan los flujos de potencia activa y reactiva para el compensador son:

$$\Delta P_{vR} = V_{vR}^2 G_{vR} + V_{vR} V_k [G_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_k) + B_{vR} \sin(\delta_{vR} - \theta_k)] \quad (3.32)$$

$$\Delta Q_{vR} = -V_{vR}^2 B_{vR} + V_{vR} V_k [G_{vR} \sin(\delta_{vR} - \theta_k) - B_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_k)] \quad (3.33)$$

Las ecuaciones que determinan los flujos de potencia activa y reactiva para el bus k son:

$$\Delta P_k = V_k^2 G_{vR} + V_k V_{vR} [G_{vR} \cos(\theta_k - \delta_{vR}) + B_{vR} \sin(\theta_k - \delta_{vR})] \quad (3.34)$$

$$\Delta Q_k = -V_k^2 B_{vR} + V_k V_{vR} [G_{vR} \sin(\theta_k - \delta_{vR}) - B_{vR} \cos(\theta_k - \delta_{vR})] \quad (3.35)$$

Al formar el Jacobiano la magnitud de voltaje V_{vR} y el ángulo de fase δ_{vR} , se toman como variables de estado.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_{vR} \\ \Delta Q_{vR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{vR}} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{vR}} V_{vR} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{vR}} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{vR}} V_{vR} \\ \frac{\partial P_{vR}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{vR}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{vR}}{\partial \delta_{vR}} & \frac{\partial P_{vR}}{\partial V_{vR}} V_{vR} \\ \frac{\partial Q_{vR}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_{vR}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_{vR}}{\partial \delta_{vR}} & \frac{\partial Q_{vR}}{\partial V_{vR}} V_{vR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \frac{\Delta V_k}{V_k} \\ \Delta \delta_{vR} \\ \frac{\Delta V_{vR}}{V_{vR}} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Análisis de Resultados del sistema eléctrico de potencia de nueve nodos (WSCC9)

En esta sección se utilizaron las técnicas en estado estable como flujos de potencia y generación de curvas PV con el objetivo de analizar el colapso de voltaje y las posibles apariciones de las bifurcaciones nodo silla y Hopf.

El caso de estudio se llevó a cabo sobre el sistema de prueba de 9 barras del Western System Coordinating Council (WSCC9).

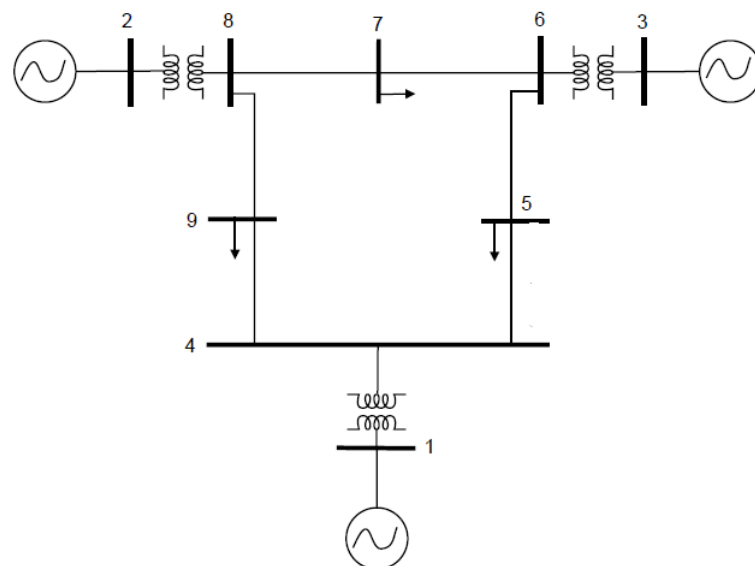


Figura 4.1: Sistema Eléctrico de Potencia de 9 Nodos (WSCC9)

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE NUEVE NODOS (WSCC9)

Los parámetros de los generadores del sistema son:

Bus	Tipo de Bus	Voltaje _[pu]	P_{gen}	Q_{gen}	P_L	Q_L
1	Slack	1.06	0.0	0.0	0.0	0.0
2	PV	1.025	1.63	0.0	0.0	0.0
3	PV	1.025	0.85	0.0	0.0	0.0
4	PQ	1	0.0	0.0	0.0	0.0
5	PQ	1	0.0	0.0	0.9	0.3
6	PQ	1	0.0	0.0	0.0	0.0
7	PQ	1	0.0	0.0	1.0	0.35
8	PQ	1	0.0	0.0	0.0	0.0
9	PQ	1	0.0	0.0	1.25	0.5

Tabla 4.1: Datos del SEP de 9 nodos (WSCC9)

Los parámetros de las líneas de transmisión del sistema son:

i	j	R_{ij} _[pu]	X_{ij} _[pu]	B_{ij} _[pu]
1	4	0.0	0.0576	0.0
4	5	0.017	0.092	0.158
5	6	0.039	0.17	0.358
3	6	0.0	0.0586	0.0
6	7	0.0119	0.1008	0.209
7	8	0.0085	0.072	0.149
8	2	0.0	0.0625	0.0
8	9	0.032	0.161	0.306
9	4	0.01	0.085	0.176

Tabla 4.2: Parámetros de las líneas de transmisión del SEP de 9 nodos (WSCC9)

Al realizar un análisis de flujos de potencia, tenemos la magnitud de voltaje y ángulo de

cada nodo:

Bus	Voltaje[pu]	$\theta[deg]$
1	1.040	0
2	1.025	-9.274
3	1.025	-4.661
4	1.026	-2.213
5	1.013	-3.685
6	1.033	1.965
7	1.016	0.727
8	1.026	3.717
9	0.996	-3.986

Tabla 4.3: Resultados del SEP de 9 nodos (WSCC9) mediante un análisis de flujos de potencia

El sistema tiene una carga base de 315 MW y 115 MVAR. La carga del sistema se incremento de forma constante dado que es la mejor forma de representar la peor condición de colapso de voltaje.

Mediante el análisis de flujos de potencia se represento la variación de los voltajes en los nodos del sistema con respecto al cambio de la potencia en la carga.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE NUEVE NODOS (WSCC9)

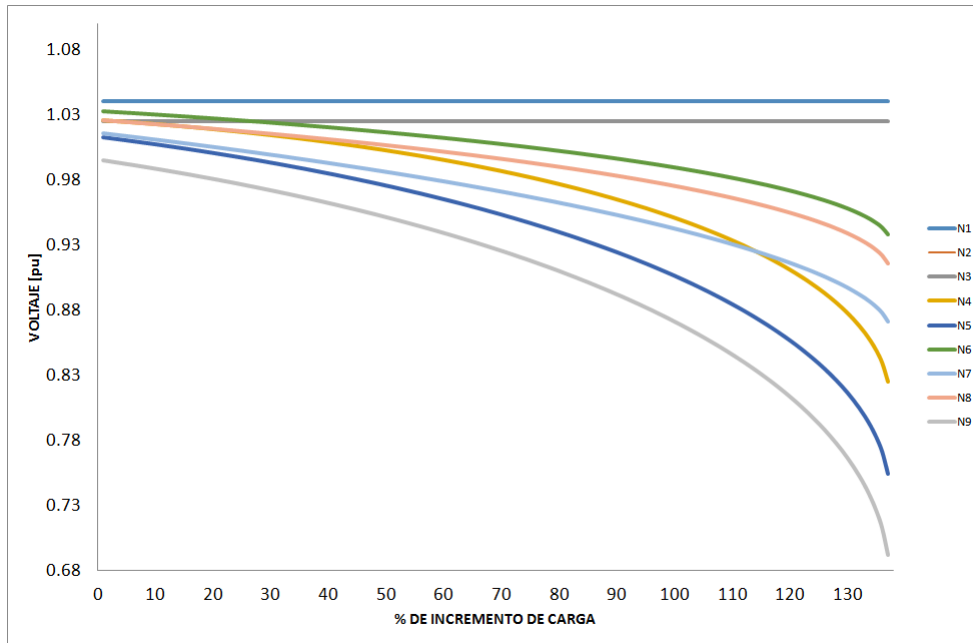


Figura 4.2: Curva PV del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) con un incremento de potencia del 137 %

Tal y como se muestra en la Figura 4.2 se observa que el sistema tiende a un colapso de voltaje cuando la carga del sistema sobrepasa el 137 % de carga. Los nodos más débiles en este incremento de potencia son los nodos 5 y el nodo 9, el nodo 9 presenta una bifurcación nodo silla con punto crítico en $V_9 = 0.6918[pu]$, $\theta_9 = -0.8061[deg]$.

Los voltajes representados en pu para los nueve nodos del sistema son los siguientes:

% Carga	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9
135	1.04	1.025	1.025	0.84840	0.7816	0.9466	0.8823	0.9255	0.7254
136	1.04	1.025	1.025	0.8390	0.7706	0.9431	0.8778	0.9215	0.7122
137	1.04	1.025	1.025	0.8246	0.7537	0.9379	0.8712	0.9153	0.6918
138	1.04	-0.0052	0.0669	0.3750	-0.5039	-0.6397	0.0064	0.0447	-0.3052

Tabla 4.4: Voltajes del SEP de 9 nodos (WSCC9), caso base

Los ángulos nodales para los nueve nodos del sistema son los siguientes:

% carga	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9
135	0	-0.6417	-0.7094	-0.3561	-0.6825	-0.7607	-0.8700	-0.7493	-0.7465
136	0	-0.6679	-0.7353	-0.3664	-0.7037	-0.7869	-0.8980	-0.7760	-0.7702
137	0	-0.7071	-0.7741	-0.3758	-0.7344	-0.8260	-0.9397	-0.8159	-0.8061
138	0	443.09	307.70	150.52	477.28	382.28	568.14	961.420	803.13

Tabla 4.5: Ángulos del SEP de 9 nodos (WSCC9), caso base

Un incremento del 137% representa una carga de $746.55MW$, y una vez que se rebasa este incremento de carga, el sistema se vuelve inestable dado que el cálculo de la matriz jacobiana del sistema se vuelve singular; por lo tanto no es posible obtener una solución del conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales.

La caída progresiva de voltaje ante el incremento de potencia representara una mayor apertura angular y una mayor transferencia de flujo de potencia en las líneas de transmisión.

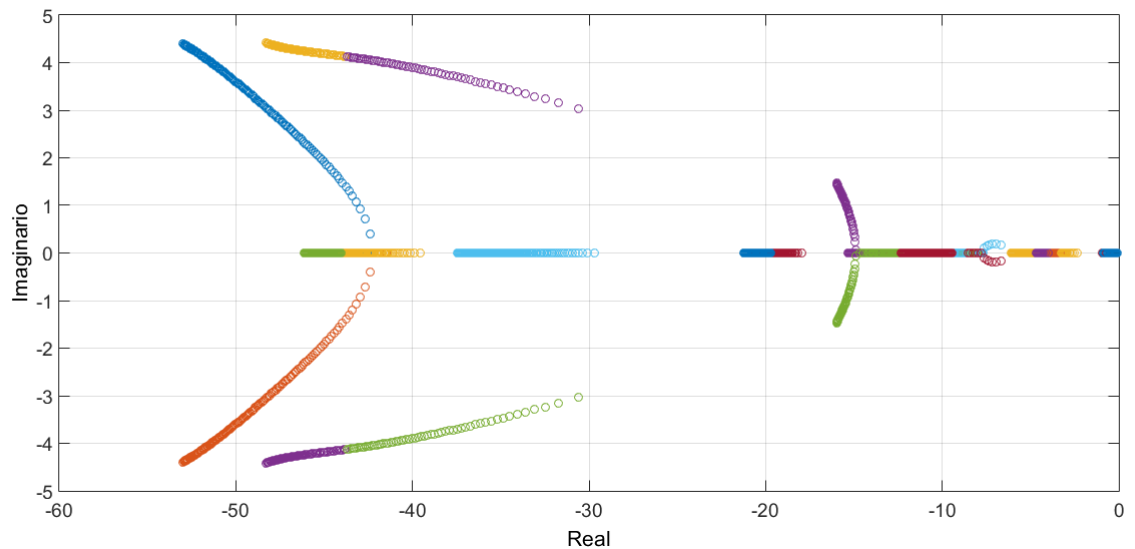


Figura 4.3: Movimiento de los Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) ante el incremento de potencia al 137%

En la Figura 4.3 se muestra el movimiento de los eigenvalores del sistema eléctrico, ante el incremento de carga del 137%, los valores propios del sistema reflejan estabilidad al tener valores reales negativos y/o valores complejos conjugados con parte real negativa, la bifurcación Hopf

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE NUEVE NODOS (WSSC9)

tiende a presentarse ante el incremento de carga, lo que podría hacer que el sistema llegara a ser inestable. Esto indica que los valores asociadas con las bifurcaciones Hopf en los sistemas de potencia son un previo aviso que indica que el sistema puede llegar a colapso de tensión.

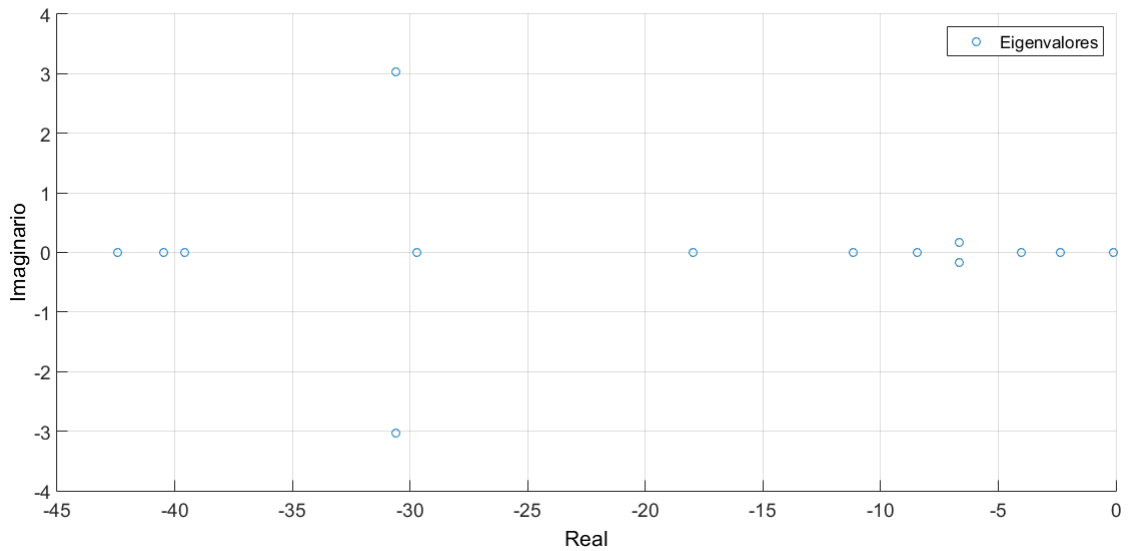


Figura 4.4: Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSSC9) cuando se encuentra con una carga al 137 %

En la Figura 4.4 se aprecian los eigenvalores del sistema eléctrico de potencia, justo cuando la potencia del sistema está al 137 % de carga. Se puede notar que uno de los valores ya está muy cercano al origen anunciando la inminente pérdida de estabilidad del sistema.

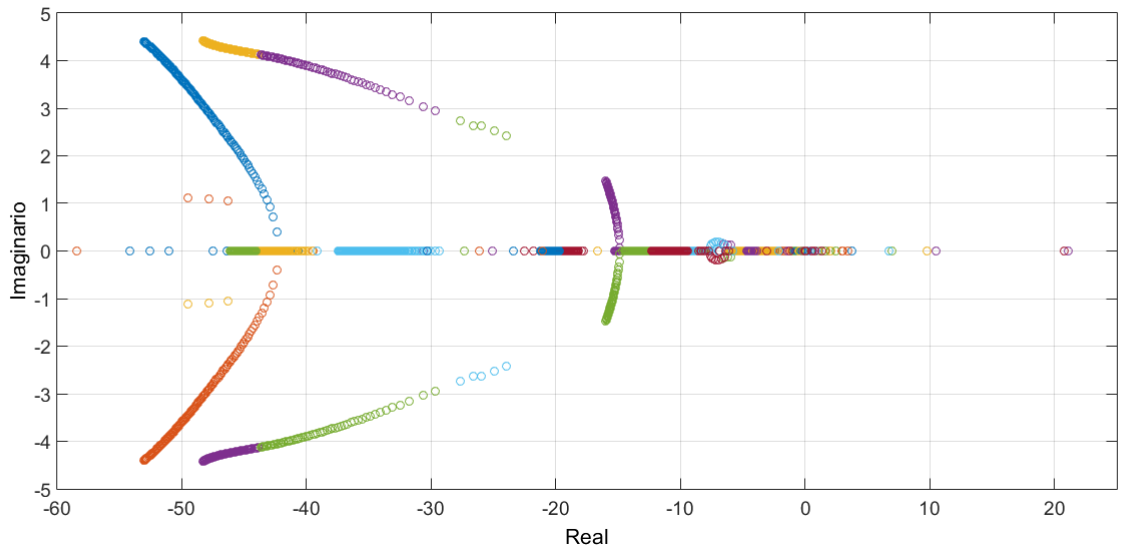


Figura 4.5: Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) con un incremento de 150 %

En la Figura 4.5 se observa que al sobrepasar el 137 % de carga el sistema cae en la inestabilidad al tener valores propios reales positivos o dos valores propios complejos conjugados que cruzan el eje imaginario hacia la parte derecha del plano complejo cuando el parámetro de bifurcación es variado (incremento de carga).

El sistema llega a soportar una potencia real de 746.55 MW hasta el punto de inestabilidad, lo que representa un incremento de carga de 431.55 MW

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE NUEVE NODOS (WSCC9)

4.0.2.1. Compensación SVC

En esta sección el sistema eléctrico de potencia (WSCC9) fue compensado con un dispositivo SVC (Static VARs Compensator) o CEV (Compensador Estático de Vars), con la finalidad de retrasar o desaparecer las bifurcaciones Nudo silla y Hopf.

Un Compensador Estático de VARs es un dispositivo que consiste de un grupo de capacitores conectados en derivación y un banco de reactores con rápido control por la conmutación de tiristores.

El objetivo es controlar la magnitud de voltaje, del nodo en donde está conectado, a un valor de referencia especificado, V_{ref} .

En este trabajo de tesis no se hace énfasis en la ubicación ideal del dispositivo FACTS; la ubicación del dispositivo se determinara por aquel nodo que sea más débil mediante su índice de voltaje nodal o en su caso aquel nodo que presente mayor sensibilidad a la variación del voltaje con respecto a la potencia.

Usando los datos del sistema (WSCC9), se colocó un compensador estático de VARs en el nodo 9 dado que es el más débil y es uno de los tres nodos que representa mayor sensibilidad juntos con los nodos 5 y 7.

Bus	Voltaje[pu]	$\theta[deg]$
1	1.040	0
2	1.025	-9.274
3	1.025	-4.661
4	1.026	-2.213
5	1.013	-3.685
6	1.033	1.965
7	1.016	0.727
8	1.026	3.717
9	0.996	-3.986

Tabla 4.6: Datos del SEP de 9 nodos (WSCC9)

Haciendo un análisis de flujos de potencia, con un Compensador Estático de VARs en el nodo 9, se puede observar que mejora el perfil de voltaje de los nodos 5, 7 y 9 al compensar el sistema.

Bus	Caso Base Voltaje[pu]	SVC Voltaje[pu]
1	1.040	1.040
2	1.025	1.025
3	1.025	1.025
4	1.026	1.0362
5	1.013	1.0209
6	1.033	1.0355
7	1.016	1.0214
8	1.026	1.0326
9	0.996	1.0233

Tabla 4.7: Comparativo del SEP de 9 nodos (WSCC9) entre el caso base y con un SVC

Los datos para el compensador estático de VARs son los siguientes:

$Q_{SVC}[pu]$	B[pu]
-0.3141	0.3

Tabla 4.8: Datos del SVC

El sistema tiene una carga base de 315 MW y 115 MVAR. La carga del sistema se incrementó de forma constante dado que es la mejor forma de representar la peor condición de colapso de voltaje.

Mediante el análisis de flujos de potencia se representa la variación de los voltajes en los nodos del sistema con respecto al cambio de la potencia en la carga, pero en este caso, el sistema está compensado en el nodo 9 con el fin de poder atrasar o desaparecer las bifurcaciones nodo silla y Hopf.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE NUEVE NODOS (WSSC9)

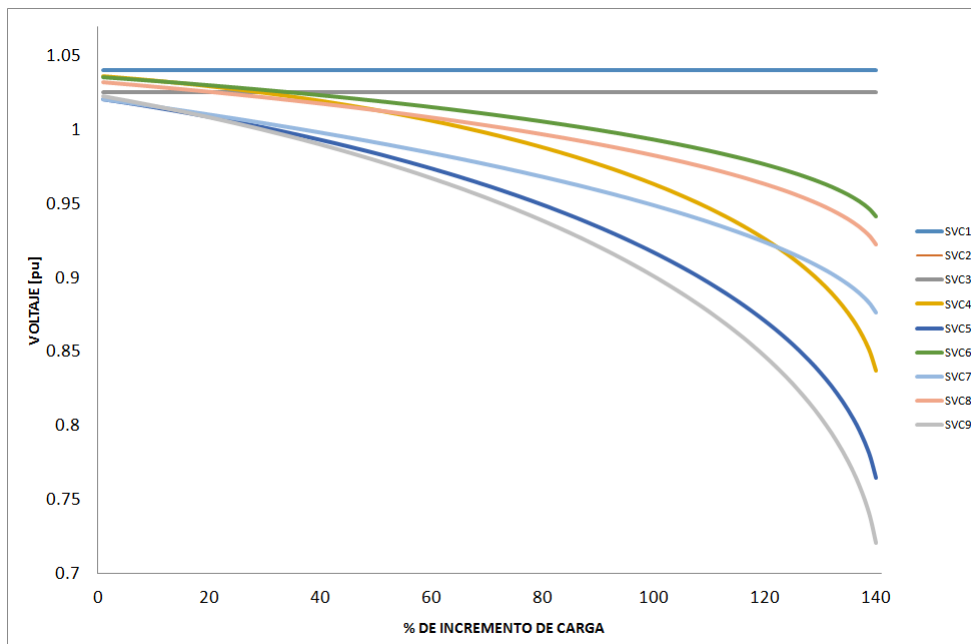


Figura 4.6: Curvas PV del sistema(WSSC9), compensado en el nodo 9, con un incremento de carga del 140 %

Tal y como se observa en la Figura 4.6 se observa que el sistema tiende a un colapso de voltaje cuando la carga del sistema sobrepasa el 140 % de carga, el bus 9 presenta una bifurcación nodo silla con punto crítico en $V_9 = 0.7207[pu]$, $\theta_9 = -0.7910[deg]$,

Los voltajes representados en pu para los nueve nodos del sistema son los siguientes:

% Carga	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇	V ₈	V ₉
138	1.04	1.025	1.025	0.8573	0.7882	0.9489	0.8859	0.9310	0.7496
139	1.04	1.025	1.025	0.8488	0.7781	0.9457	0.8818	0.9272	0.7374
140	1.04	1.025	1.025	0.8370	0.7642	0.9413	0.8762	0.9221	0.7207
141	1.04	1.025	1.025	0.4237	0.0265	0.6450	-0.3548	-0.1047	-0.1685

Tabla 4.9: Voltajes del SEP de 9 nodos (WSSC9) con un SVC en el nodo 9

Los ángulos nodales representados para los nueve nodos del sistema son los siguientes:

% carga	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9
138	0	-0.6386	-0.7070	-0.3578	-0.6821	-0.7582	-0.8673	-0.7456	-0.7408
139	0	-0.6624	-0.7306	-0.3653	-0.7008	-0.7820	-0.8928	-0.7698	-0.7621
140	0	-0.6944	-0.7624	-0.3751	-0.7260	-0.8141	-0.9270	-0.8024	-0.7910
141	0	-315.15	-358.66	-13.512	-448.92	-364.96	-76.257	-301.32	-243.41

Tabla 4.10: Ángulos del SEP de 9 nodos (WSCC9) con un SVC en el nodo 9

Un incremento del 140% representa una carga de 756 MW, y una vez que se rebasa este incremento de carga, el sistema se vuelve inestable dado que el cálculo de la matriz jacobiana del sistema se vuelve singular; por lo tanto no es posible obtener una solución del conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales.

La caída progresiva de voltaje ante el incremento de potencia representa una mayor apertura angular y una mayor transferencia de flujo de potencia en las líneas de transmisión.

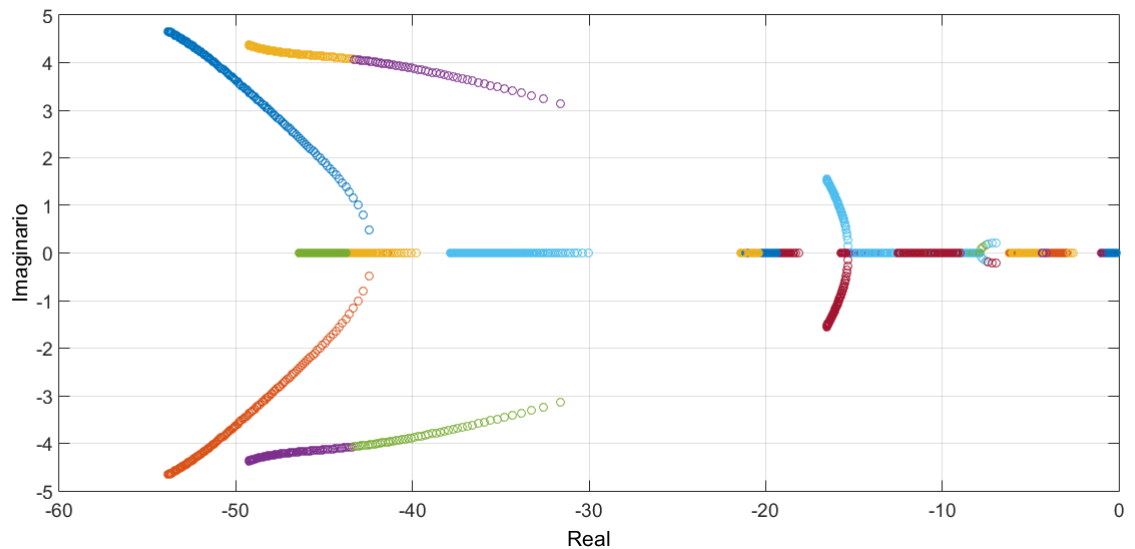


Figura 4.7: Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) con un incremento hasta el 140%

En la figura 4.7 se muestra el movimiento de los eigenvalores del sistema eléctrico de potencia, ante el incremento de carga del 140%, los valores propios del sistema reflejan estabilidad al tener valores reales negativos y/o valores complejos conjugados con parte real negativa, la bifurcación

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE NUEVE NODOS (WSCC9)

Hopf tiende a presentarse ante el incremento de carga, lo que podría hacer que el sistema llegara a ser inestable. Esto indica que los valores asociados con las bifurcaciones Hopf en los sistemas de potencia son un previo aviso que indican que el sistema puede llegar a colapso de tensión.

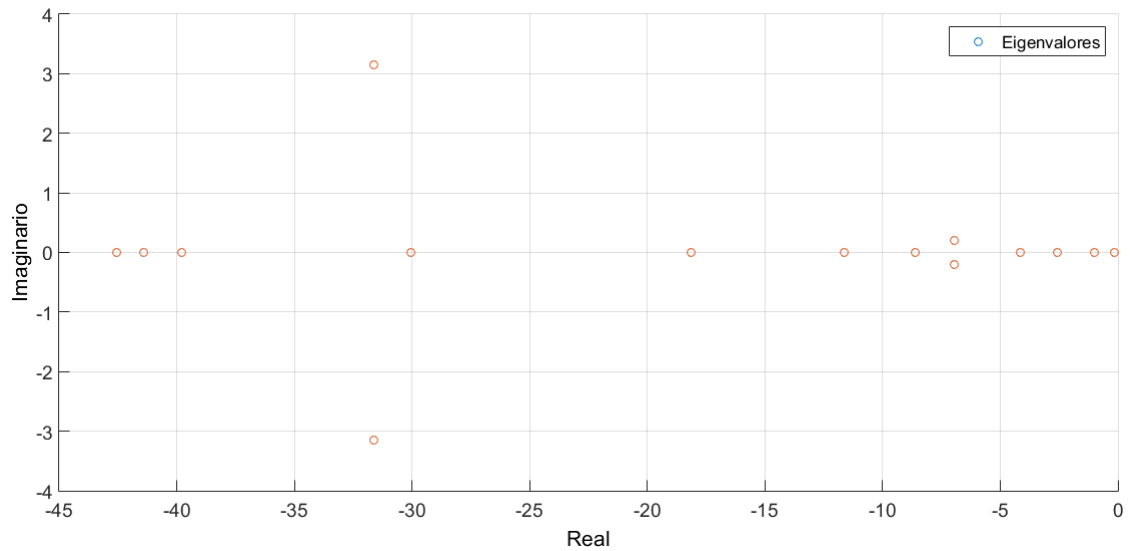


Figura 4.8: Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) con carga al 140 %

En la figura 4.8 se aprecian los eigenvalores del sistema eléctrico de potencia, justo cuando la potencia del sistema está al 140 % de carga. Se puede notar que al igual que el caso base, es inminente la pérdida de estabilidad en el sistema aun cuando se cuenta con la compensación de un SVC.

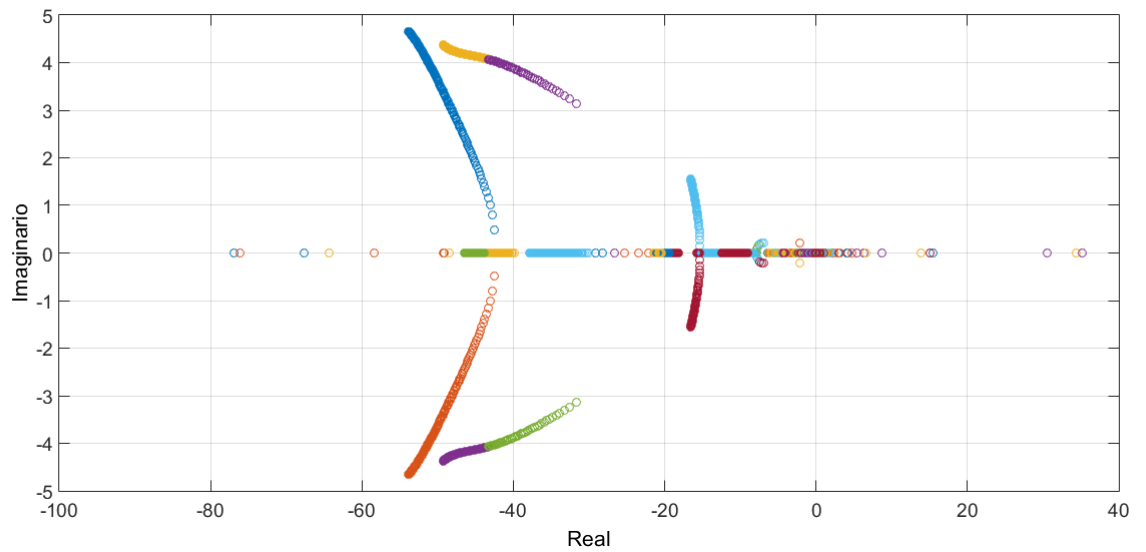


Figura 4.9: Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) con un incremento de carga al 150 %

En la figura 4.9 se observa que al sobrepasar el 140 % de carga el sistema cae en la inestabilidad al tener valores propios reales positivos o dos valores propios complejos conjugados que cruzan el eje imaginario hacia la parte derecha del plano complejo cuando el parámetro de bifurcación es variado (incremento de carga).

Podemos observar que el sistema puede soportar una carga de 756 MW al ser compensado por un SVC, comparado con el caso base, significa que con la ayuda del compensador podemos soportar 9.45 MW más de carga.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE NUEVE NODOS (WSCC9)

4.0.2.2. Compensación STATCOM

El STATCOM (compensador estático síncrono) es un dispositivo basado en una fuente conmutada de voltaje (VSC) conectada en paralelo al sistema de transmisión a través de un transformador de acoplamiento. La finalidad de este controlador es convertir un voltaje de entrada de corriente directa en un voltaje de corriente alterna, con una magnitud de voltaje y ángulo de fase controlable a frecuencia fundamental. Un STATCOM no tiene inercia, por lo cual puede actuar en fracciones de segundo. El STATCOM puede ser usado para la regulación de voltaje en un sistema de potencia, permitiendo un incremento de transmisión de potencia, mejoramiento de la característica de operación en estado estable, así como la estabilidad operativa del sistema.

Usando los datos del sistema (WSCC9), se a colocó un compensador estático de VARs en el nodo 9 dado que es el más débil.

Bus	Voltaje[pu]	$\theta[deg]$
1	1.040	0
2	1.025	-9.274
3	1.025	-4.661
4	1.026	-2.213
5	1.013	-3.685
6	1.033	1.965
7	1.016	0.727
8	1.026	3.717
9	0.996	-3.986

Tabla 4.11: Datos del SEP de 9 nodos (WSCC9)

Haciendo un análisis de flujos de potencia, con un STATCOM en el nodo 9, se puede observar que los voltajes nodales se mejoraron al compensar el sistema.

Bus	Caso Base Voltaje[pu]	STATCOM Voltaje[pu]
1	1.040	1.040
2	1.025	1.025
3	1.025	1.025
4	1.026	1.0362
5	1.013	1.0209
6	1.033	1.0355
7	1.016	1.0214
8	1.026	1.0326
9	0.996	1.0233

Tabla 4.12: Comparativo del SEP de 9 nodos (WSCC9) entre el caso base y un STATCOM

Voltaje _{Fuente} [pu]	θ_{fuente} [deg]	P.Q _{Bus} [pu]	P.Q _{SSC} [pu]
1.0239	-3.9935	31.4100	-31.4288

Tabla 4.13: Datos del STATCOM

El sistema tiene una carga base de 315 MW y 115 Mvar. La carga del sistema se incrementa de forma constante dado que es la mejor forma de representar la peor condición de colapso de voltaje.

Mediante el análisis de flujos de potencia se representara la variación de los voltajes en los nodos del sistema con respecto al cambio de la potencia en la carga, pero en este caso, el sistema estará compensado en el nodo 9 con el fin de poder atrasar o desaparecer las bifurcaciones nodo silla y Hopf.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE NUEVE NODOS (WSCC9)

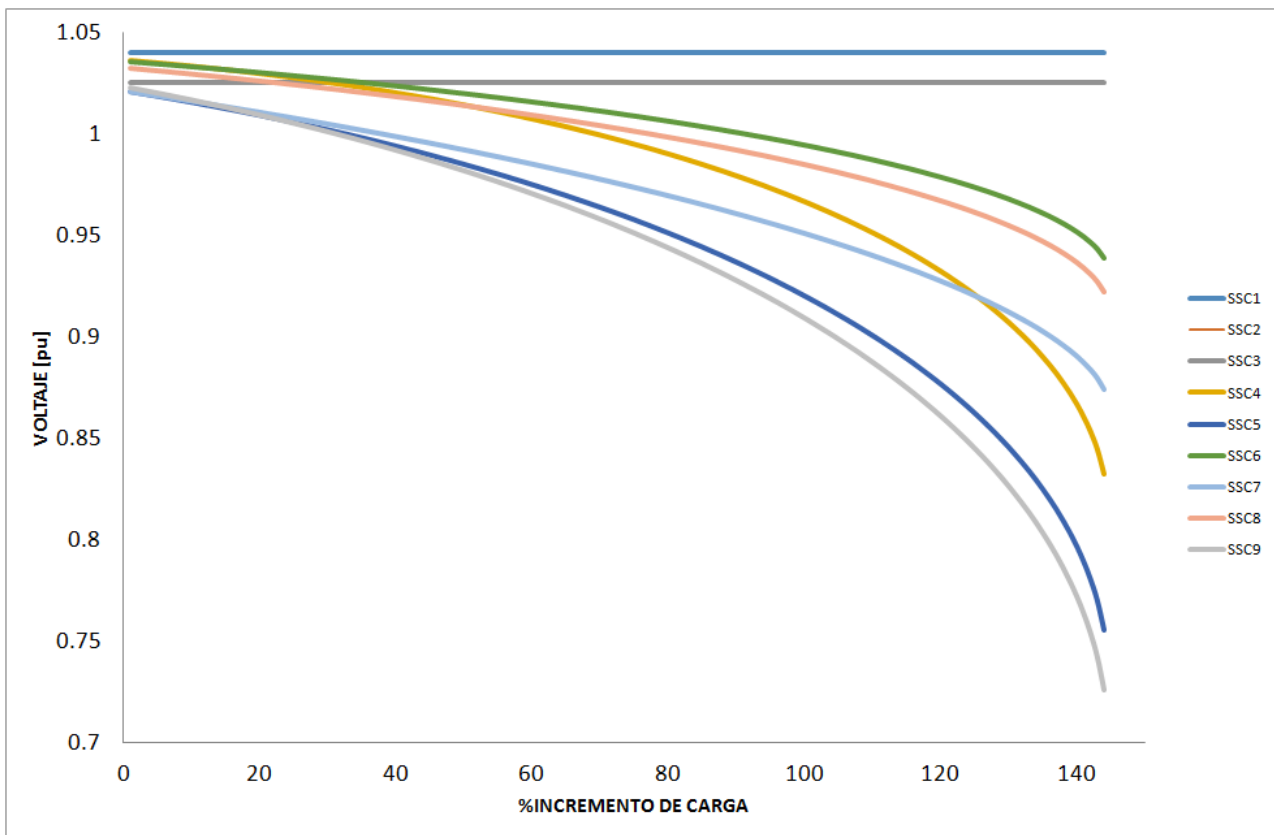


Figura 4.10: Curvas PV del sistema(WSCC9), compensado en el nodo 9, con un incremento de carga del 144%

Tal y como se muestra en las Figura 4.10 se observa que el sistema tiende a un colapso de voltaje cuando la carga del sistema sobrepasa el 144 % de carga, el bus 9 presenta una bifurcación nodo silla con punto crítico en $V_9 = 0.7259[pu]$, $\theta_9 = -0.8174[deg]$.

Los voltajes representados en pu para los nueve nodos del sistema son los siguientes:

% Carga	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇	V ₈	V ₉
142	1.04	1.025	1.025	0.8534	0.7801	0.9465	0.8834	0.9306	0.7541
143	1.04	1.025	1.025	0.8446	0.7695	0.9432	0.8792	0.9269	0.7423
144	1.04	1.025	1.025	0.8324	0.7594	0.9387	0.8736	0.9218	0.7259
145	1.04	1.025	1.025	0.9056	-0.0984	-0.0293	-0.1112	-0.1461	-0.0038

Tabla 4.14: Voltajes del SEP de 9 nodos (WSCC9) con un STATCOM en el nodo 9

Los ángulos nodales representados para los nueve nodos del sistema son los siguientes:

% carga	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9
142	0	-0.6683	-0.7371	-0.3696	-0.7066	-0.7885	-0.8996	-0.7753	-0.7694
143	0	-0.6931	-0.7619	-0.3774	-0.7264	-0.8134	-0.9262	-0.8005	-0.7870
144	0	-0.6944	-0.7624	-0.3751	-0.7260	-0.8141	-0.9270	-0.8024	-0.7910
145	0	9178.89	1512.15	-75.853	-421.033	-3203.775	5410.137	-9201.949	109190.189

Tabla 4.15: Ángulos del SEP de 9 nodos (WSCC9) con un STATCOM en el nodo 9

Un incremento del 144% representa una carga de 768.6MW, y una vez que se rebasa este incremento de carga, el sistema se vuelve inestable dado que el cálculo de la matriz jacobiana del sistema se vuelve singular; por lo tanto no es posible obtener una solución del conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales.

La caída progresiva de voltaje ante el incremento de potencia representa una mayor apertura angular y una mayor transferencia de flujo de potencia en las líneas de transmisión.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE NUEVE NODOS (WSSC9)

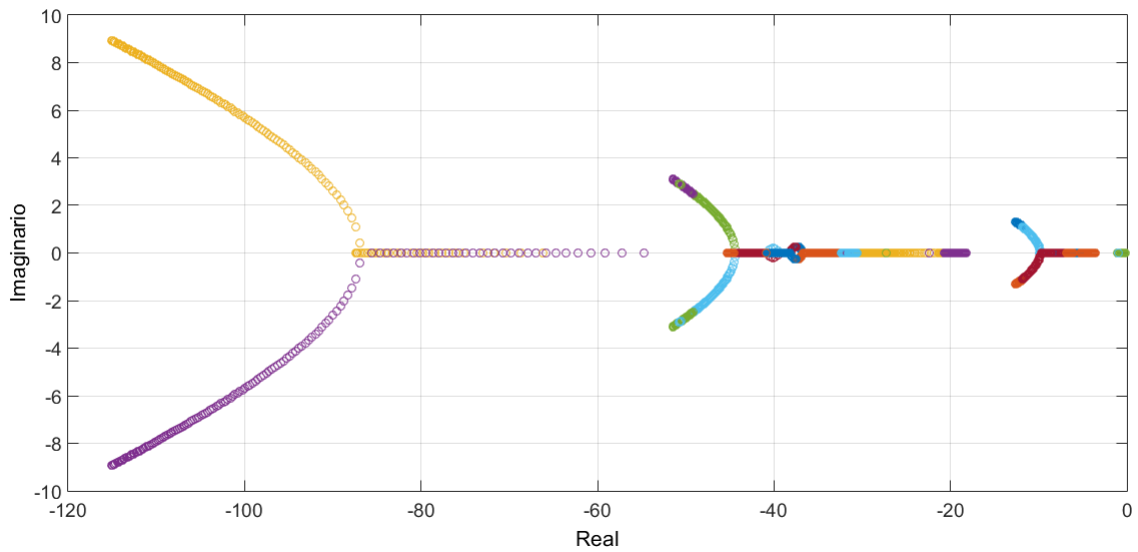


Figura 4.11: Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSSC9) ante un incremento del 144 %

En la figura 4.11 se muestra el movimiento de los eigenvalores del sistema eléctrico, ante el incremento de carga del 144 %, los valores propios del sistema reflejan estabilidad al tener valores reales negativos y/o valores complejos conjugados con parte real negativa, la bifurcación Hopf tiende a presentarse ante el incremento de carga, lo que podría hacer que el sistema llegara a ser inestable. Esto indica que los valores asociados con las bifurcaciones Hopf en los sistemas de potencia son un previo aviso que indican que el sistema puede llegar a colapso de voltaje.

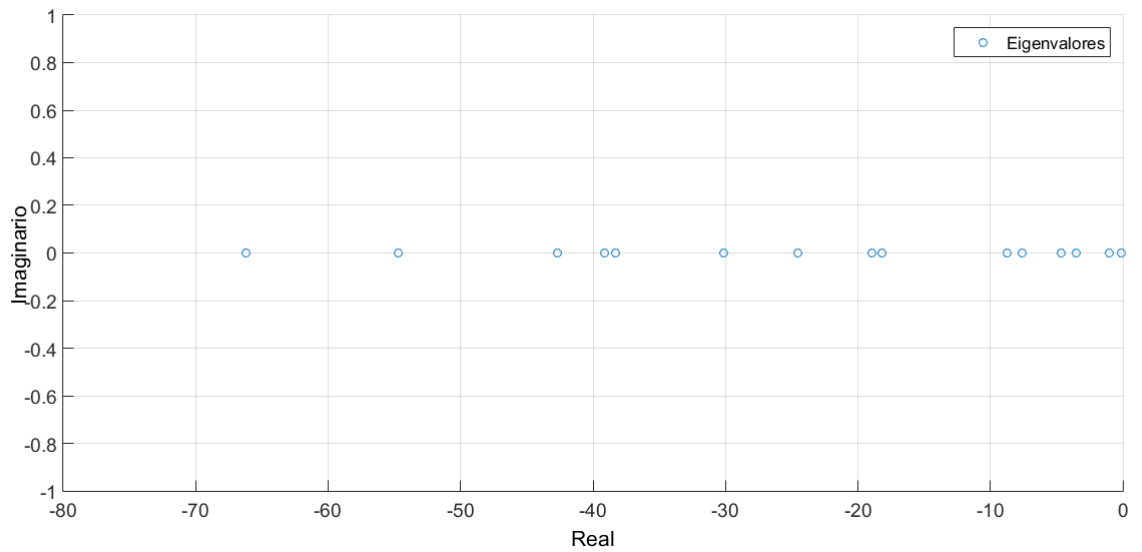


Figura 4.12: Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) con una carga del 144 %

En la figura 4.12 se aprecia los eigenvalores del sistema eléctrico de potencia, justo cuando la potencia del sistema esta al 144 % de carga. A pesar de no tener valores complejos conjugados con parte real negativa el sistema al igual que el caso base y el SVC también tiende a una inminente pérdida de estabilidad.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE NUEVE NODOS (WSCC9)

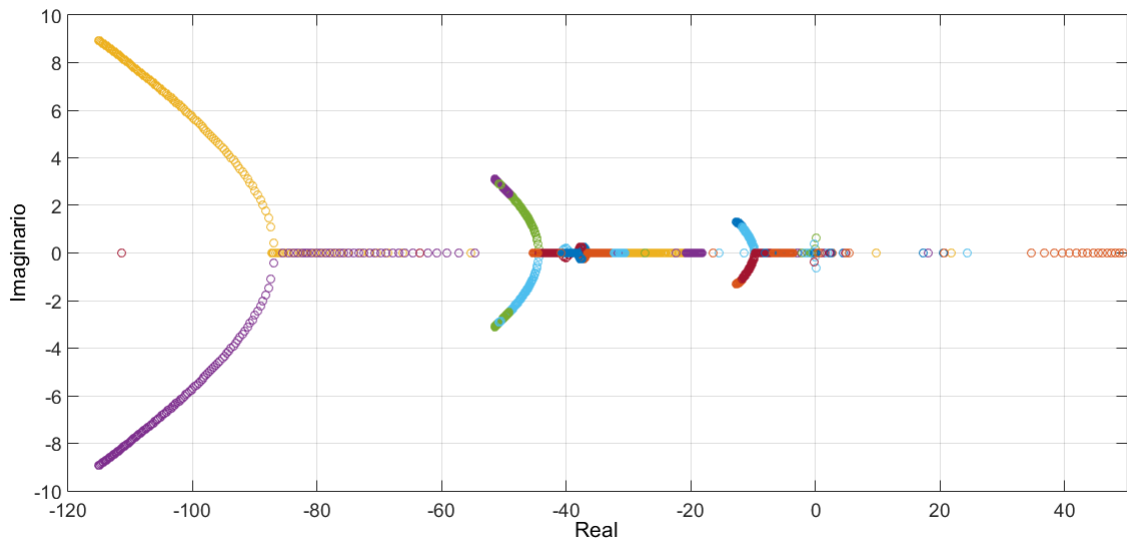


Figura 4.13: Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSCC9) ante un incremento de carga del 150%

En la figura 4.13 se observa que al sobrepasar el 144% de carga el sistema cae en la inestabilidad al tener valores propios reales positivos o dos valores propios complejos conjugados que cruzan el eje imaginario hacia la parte derecha del plano complejo cuando el parámetro de bifurcación es variado (incremento de carga).

Podemos observar que el sistema puede soportar una carga de 768.6 MW al ser compensado por un STATCOM, comparado con el caso base, significa que con la ayuda del compensador podemos soportar 22.05 MW más de carga.

En comparación con el SVC podemos soportar 12.6 MW más de carga.

4.0.2.3. Comparativo

En esta sección se realiza la comparación del desempeño de ambos compensadores, para determinar si se retrasan o desaparecen las bifurcaciones nodos silla y Hopf.

Sin realizar incremento de carga en el sistema (WSSC9) las condiciones en el bus 9 al realizar un análisis de flujos de potencia son las siguientes:

•	Voltaje[pu]	θ [deg]
Sin Compensación	0.996	-3.986
SVC	1.0233	-3.990
STATCOM	1.0233	-3.990

Tabla 4.16: Comparativo de los 3 Compensadores

A continuación podemos ver como al incrementar el parámetro de carga y realizar flujos de potencia, el voltaje en el nodo 9 tiende al colapso voltaje mientras este parámetro va creciendo.

% INCREMENTO DE CARGA	N9	SVC9	SSC9
130	0.76622373	0.80577793	0.82637153
131	0.75975431	0.80055091	0.82219817
132	0.75268663	0.79500465	0.81784097
133	0.7448442	0.78908274	0.81327791
134	0.73594164	0.78270992	0.80848215
135	0.72545842	0.77578177	0.80342042
136	0.71222229	0.76814598	0.79805064
137	0.69180068	0.75956452	0.79231826
138	-0.30520314	0.74962549	0.78615036
139	-0.53333317	0.73748703	0.77944567
140	0.57788372	0.72072802	0.7720561
141	0.63510255	0.16855079	0.76374951
142	0.44090101	-0.02719122	0.75412228
143	0.65743006	0.60820003	0.74234218
144	0.60059325	-0.95444844	0.72596283
145	0.05904955	-0.80244817	-0.00381926
146	-0.43788015	-0.07902384	0.00153726
147	-2.84047652	1.3075779	0.00191521
148	0.6244113	-7.42150289	0.00232767
149	-0.59146981	2.2904609	-0.02525877
150	1.80892135	0.01011389	0.00034461

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE NUEVE NODOS (WSSC9)

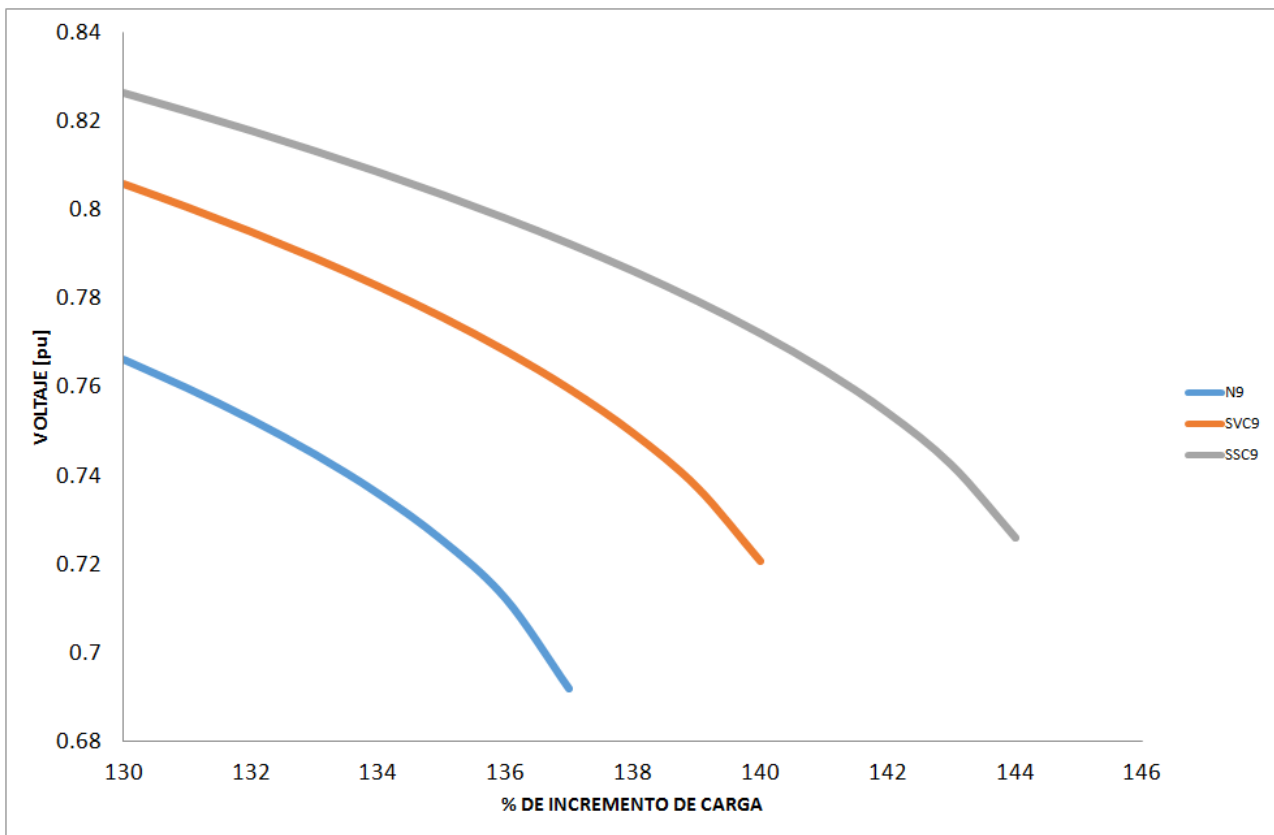


Figura 4.14: Bifurcaciones nodo-silla en el nodo 9

Se observa que en la Figura 4.14 las bifurcaciones Nodo silla en ambos compensadores no desaparecen, solo retrasan su aparición; el STATCOM a comparación del SVC tiene mejor nivel de voltaje y mayor margen de potencia activa.

•	Voltaje [pu]	% de Incremento alcanzado	P. Activa [MW] alcanzado
Sin compensación	0.6918007	137	746.55
SVC	0.7207280	140	756
STATCOM	0.7259628	144	768.60

Tabla 4.17: Potencia Real alcanzada con cada compensador

Los movimientos de los eigenvalores en los tres casos se muestran en las figuras siguientes:

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE NUEVE NODOS (WSSC9)

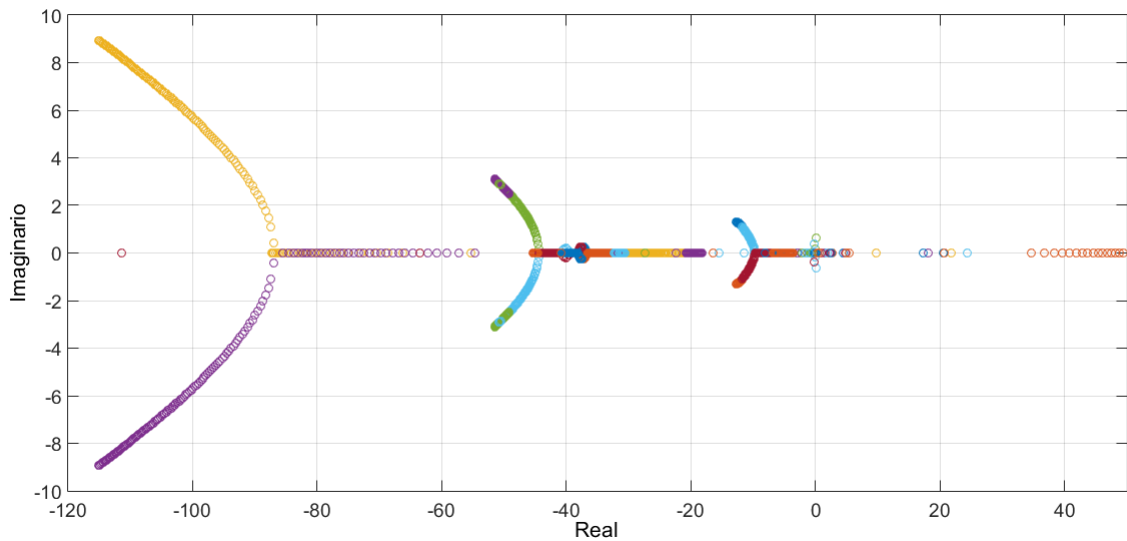


Figura 4.17: Movimiento de los Eigenvalores del Sistema Eléctrico de Potencia (WSSC9) compensado en el nodo 9 con un SSC

En las Figuras 4.15 4.16 y 4.17 se graficaron los eigenvalores del sistema de cada compensador hasta un punto donde se rebasa la estabilidad. En ellas se aprecian como el eje real negativo quien representa la estabilidad varia de rango, siendo el caso base el mas pequeño de hasta menos sesenta y mas grande el STATCOM de hasta menos ciento veinte. Lo cual nos hace pensar que podemos observar que compensador da mas estabilidad al sistema mirando el rango que alcanza el eje real negativo.

Al observar las Figuras 4.15 4.16 y 4.17 las Bifurcaciones Hopf en el sistema (WSSC9) en ambos compensadores no desaparecen, solo retrasan su aparición; el STATCOM a comparación del SVC tiende a tener menos presencia, pero aun así esta presente a lo largo del incremento de carga.

Conclusiones

En el presente trabajo se realizó un estudio de estabilidad de voltaje para el sistema eléctrico de potencia de 9 nodos de Western System Coordinating Council, al incrementar la carga del sistema de forma constante se pudo representar la condición más crítica para representar un colapso de voltaje. El análisis trabajado se basó en la teoría de bifurcaciones; de esta forma se estudió el colapso de voltaje determinado por las gráficas PV de los sistemas de potencia, además se visualizaron las bifurcaciones nodo silla y Hopf por el cálculo de los valores propios de la matriz Jacobiana.

El análisis de flujos de potencia permitió ver que el colapso de voltaje inicia en el nodo más débil y posteriormente se extiende hacia los demás nodos haciendo cada vez más severo el problema. Los resultados determinaron que la Bifurcación nodo silla es inevitable cuando se incrementa la carga y el sistema no tiene la capacidad de cubrir los incrementos de demanda.

Los resultados observados muestran la gran complejidad del comportamiento que presentan los sistemas eléctricos de potencia aún cuando éstos sean relativamente pequeños. Sin embargo, dicho comportamiento se pudo analizar adecuadamente empleando la teoría de bifurcaciones. En base a los diagramas de bifurcación, es posible identificar las regiones de operación estable e inestable.

Al compensar el sistema eléctrico de potencia mediante un Compensador Estático de VARs, se incrementa el punto de máxima cargabilidad del sistema; por lo tanto también se retrasa la aparición de la bifurcación Hopf. Esto significa que el límite de cargabilidad se presenta cada vez en un mayor valor del parámetro de bifurcación y del voltaje; es decir, la región de operación estable es mayor.

Se pudo observar que además del retraso en la aparición de las bifurcaciones, el SVC es capaz de regular el perfil de voltaje en el nodo de carga. A pesar de que con la conexión del SVC se incrementó la región de operación estable y se logró retrasar la aparición de las bifurcaciones, no se consiguió la eliminación de éstas.

De la misma manera que con el SVC, al compensar la potencia reactiva en el nodo de carga mediante un Compensador Estático Síncrono se consiguió incrementar el punto de máxima

5. CONCLUSIONES

cargabilidad del sistema en el cual aparecen las bifurcaciones.

El uso del STATCOM retrasó la aparición de las bifurcaciones y también incrementó el voltaje al cual ocurren las anteriores. El límite de cargabilidad se presenta cada vez en un mayor valor del parámetro de bifurcación y del voltaje; es decir, la región de operación estable es mayor.

El uso del STATCOM incrementa la región de operación estable y consigue retrasar la aparición de las bifurcaciones; sin embargo, no logra la eliminación de éstas.

Bibliografía

- [1] Ajarapu, V. and Christy, C. (1992). The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 7(1):416–423. [3](#)
- [2] Ayasun, S., Nwankpa, C. O., and Kwatny, H. G. (2004). Computation of singular and singularity induced bifurcation points of differential-algebraic power system model. *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, 51(8):1525–1538. [5](#)
- [3] Ben-Kilani, K. and Elleuch, M. (2013). Structural analysis of voltage stability in power systems integrating wind power. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 28(4):3785–3794. [6](#)
- [4] Berntsen, T., Flatabo, N., Foosnaes, J., and Johannesen, A. (1983). Sensitivity signals in detection of network condition and planning of control actions in a power system. In *CIGRE-Ib AC Symposium on Control Applications for Power System Security*, volume 208. [20](#)
- [5] Berrouk, F., Rachedi, B. A., Lemzadmi, A., Bounaya, K., and Zeghache, H. (2014). Applications of shunt facts controller for voltage stability improvment. In *Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), 2014 International Conference on*, pages 1–6. IEEE. [2](#), [6](#)
- [6] Cañizares, C., De Souza, A. C., Quintana, V. H., et al. (1996). Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 11(3):1441–1450. [3](#)
- [7] Canizares, C. et al. (1995). On bifurcations, voltage collapse and load modeling. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 10(1):512–522. [2](#), [10](#), [11](#), [14](#), [16](#), [17](#), [18](#)
- [8] Cañizares, C. A. (1995). Conditions for saddle-node bifurcations in ac/dc power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 17(1):61–68. [1](#), [3](#), [14](#)
- [9] Cañizares, C. A. and Hranilovic, S. (1994). Transcritical and hopf bifurcations in ac/dc systems. *Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena III—Voltage Stability and Security*, pages 105–114. [1](#), [18](#)

- [10] Chiang, H.-D., Dobson, I., Thomas, R. J., Thorp, J. S., and Fekih-Ahmed, L. (1990). On voltage collapse in electric power systems. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 5(2):601–611. [2](#)
- [11] Chiang, H.-D., Flueck, A. J., Shah, K. S., and Balu, N. (1995). Cpflo: A practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 10(2):623–634. [3](#)
- [12] Dobson, I. and Chiang, H.-D. (1989). Towards a theory of voltage collapse in electric power systems. *Systems & Control Letters*, 13(3):253–262. [2](#)
- [13] Enrique Acha, Claudio R Fuerte Esquivel, H. A. P. C. A. C. (2000). *Modelling and Simulation in Power Networks*. IEEE. [33](#), [38](#)
- [14] Flatabo, N., Ognedal, R., and Carlsen, T. (1990). Voltage stability condition in a power transmission system calculated by sensitivity methods. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 5(4):1286–1293. [20](#)
- [15] Gu, W., Milano, F., Jiang, P., and Tang, G. (2007). Hopf bifurcations induced by svc controllers: A didactic example. *Electric power systems research*, 77(3):234–240. [6](#)
- [16] Guo, Q., Yuan, S., Gu, C., and Zhao, Z. (2014). Research on active voltage stability of distribution network based on the bifurcation theory. In *Electricity Distribution (CICED), 2014 China International Conference on*, pages 1051–1055. IEEE. [6](#)
- [17] Hingorani, N. G. and Gyugyi, L. (2000). *Understanding facts*. IEEE press. [32](#), [33](#), [36](#), [38](#)
- [18] Hiskens, I. and Hill, D. (1991). Failure modes of a collapsing power system. In *Proceedings NSF/ECC Workshop on Bulk Power System Voltage Phenomena II*, pages 53–63. [3](#)
- [19] Idris, R. and Loh, H. (2013). Modelling and simulation of statcom & svc. In *Research and Development (SCORED), 2013 IEEE Student Conference on*, pages 7–12. IEEE. [6](#)
- [20] Kavasseri, R. G. and Padiyar, K. (2001). Analysis of bifurcations in a power system model with excitation limits. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 11(09):2509–2516. [2](#)
- [21] Kumar, P. (2015). Application of fact devices for voltage stability in a power system. In *Intelligent Systems and Control (ISCO), 2015 IEEE 9th International Conference on*, pages 1–5. IEEE. [2](#)
- [22] Kundur, P., Balu, N. J., and Lauby, M. G. (1994). *Power system stability and control*, volume 7. McGraw-hill New York. [VII](#), [9](#)
- [23] Lakkireddy, J., Rastgoufard, R., Leevongwat, I., and Rastgoufard, P. (2015). Steady state voltage stability enhancement using shunt and series facts devices. In *Power Systems Conference (PSC), 2015 Clemson University*, pages 1–5. IEEE. [7](#)
- [24] Li, S., Zhao, Q., Chen, C., and Xu, Y. (2012). A comparative study on voltage stability bifurcation control ability of svc and statcom. In *Electricity Distribution (CICED), 2012 China International Conference on*, pages 1–4. IEEE. [6](#)

-
- [25] Löf, P., Andersson, G., and Hill, D. (1993). Voltage stability indices for stressed power systems. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 8(1):326–335. 3
- [26] Ma, Y., Huang, A., and Zhou, X. (2015). A review of statcom on the electric power system. In *Mechatronics and Automation (ICMA), 2015 IEEE International Conference on*, pages 162–167. IEEE. 2, 7
- [27] Mansour, Y., Alvarado, F., Committee, I. P. S. E., et al. (1993). Suggested techniques for voltage stability analysis. IEEE Power Engineering Society. 3
- [28] Marszalek, W. and Trzaska, Z. W. (2005). Singularity-induced bifurcations in electrical power systems. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 20(1):312–320. 5
- [29] Marujo, D., Zambroni de Souza, A., Lopes, B. I. L., Santos, M. V., and Lo, K. L. (2015). On control actions effects by using curves. 2, 7
- [30] Mathur, R. M. and Varma, R. K. (2002). *Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems*. John Wiley & Sons. 36, 38
- [31] Pereira, R., Ferreira, C., and Barbosa, F. (2014). Comparative study of statcom and svc performance on dynamic voltage collapse of an electric power system with wind generation. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, 12(2):138–145. 7
- [32] Rabby, M. K. M. et al. (2013). Bifurcation analysis to identify voltage collapse in bangladesh power system. In *Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), 2013 International Conference on*, pages 1–5. IEEE. 2
- [33] Rajagopalan, C., Sauer, P., and Pai, M. (1989). An integrated approach to dynamic and static voltage stability. In *1989 American Control Conference*, pages 1231–1236. 3
- [34] Seydel, R. (1988). From equilibrium to chaos: Practical bifurcation and stability theory. 16
- [35] Tamura, Y., Mori, H., and Iwamoto, S. (1983). Relationship between voltage instability and multiple load flow solutions in electric power systems. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, (5):1115–1125. 3
- [36] Taylor, C. W. (1994). *Power system voltage stability*. McGraw-Hill. 2
- [37] Venikov, V., Stroeve, V., Idelchick, V., and Tarasov, V. (1975). Estimation of electrical power system steady-state stability in load flow calculations. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, 94(3):1034–1041. 3
- [38] Yorino, N., Li, H.-Q., and Sasaki, H. (2005). A predictor/corrector scheme for obtaining q-limit points for power flow studies. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 20(1):130–137. 5
- [39] You-jie, M., Hu-long, W., Xue-Song, Z., Ji, L., and Hai-Shan, Y. (2009). Bifurcation analysis on power system voltage stability. In *Intelligent Computation Technology and Automation, 2009. ICICTA'09. Second International Conference on*, volume 3, pages 26–29. IEEE. 5