

xx (93341.1)



CINVESTAV

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN
Unidad Guadalajara

**DESARROLLO DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS LINEAL
PARA EL ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE Y
LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS DE CONTROL
BASADAS EN DISPOSITIVOS FACTS**

Tesis que presenta



MARCO ANTONIO PÉREZ GONZÁLEZ

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

En la especialidad de
Ingeniería Eléctrica

Guadalajara, Jal., Marzo de 2001

**CINVESTAV I. P. N.
SECCION DE INFORMACION
Y DOCUMENTACION**

CLASIF.: _____
ADQUIS.: tesis-2001
FECHA: 19-sep-01
PROCED: Serv. Bibliotecas
\$ _____

**DESARROLLO DE TÉCNICAS DE ANALISIS LINEAL
PARA DEL ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE
Y LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS DE CONTROL
BASADAS EN DISPOSITIVOS FACTS**

**Tesis de Maestría en Ciencias
Ingeniería Eléctrica**

Por:

Marco Antonio Pérez González

Ingeniero Mecánico Electricista

Universidad de Colima, 1993-1998

Becario del CONACyT, expediente no. 129312

Directores de Tesis:

**Dr. Arturo Román Messina
Dr. Claudio Rubén Fuerte Esquivel**

CINVESTAV del IPN Unidad Guadalajara, Marzo de 2001

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se presenta la aplicación de técnicas de análisis lineal, al estudio de la estabilidad de voltaje en estado estable en sistemas de potencia, así como al desarrollo de medidas de refuerzo basadas en la aplicación de tecnologías enmarcadas en el concepto de Esquemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS).

Se propone un modelo lineal del sistema de potencia para estudios de estado estable con la capacidad de incluir de manera simplificada la operación de dispositivos de FACTS. Con base en este modelo se determinan relaciones de sensibilidad que permiten estudiar, de forma aproximada, el efecto de la ubicación de estos dispositivos en la respuesta del sistema. A continuación se deduce un modelo equivalente de estado el cual permite la aplicación de métodos de análisis lineal, al análisis de la estabilidad de voltaje y el desarrollo de medidas correctivas.

El estudio del punto crítico de operación correspondiente a la condición de máxima cargabilidad se aborda con especial interés en el desarrollo de técnicas alternativas de análisis según dos perspectivas complementarias de análisis: el análisis modal y el análisis de valores singulares de las ecuaciones de flujo de potencia modificadas para incluir la representación de dispositivos de control en la red de transmisión.

El método propuesto permite identificar en forma precisa las zonas del sistema de potencia propensas a exhibir un comportamiento inestable en el sentido de voltaje e identifica las localizaciones más adecuadas para la instalación de dispositivos compensadores FACTS ya sea en serie o en paralelo que permitan mitigar el fenómeno. Se ofrece un análisis del modelo derivado así como de las características de cada uno de los elementos que lo conforman.

La metodología propuesta se aplica al estudio de la estabilidad de voltaje en un sistema simplificado con el objeto de evaluar su aplicación práctica. Se hace una comparación con los resultados obtenidos por otros investigadores. Por último, el método desarrollado se aplica al estudio de la estabilidad de voltaje en un modelo hipotético derivado de la red interconectada de Guatemala. Se discute la aplicación de dispositivos de FACTS para mejorar los márgenes de estabilidad del sistema.

Dedico este trabajo especialmente a mis padres Sra. Maria Mercedes González Suárez y Sr. Marco Antonio Pérez Sánchez q.e.p.d.†. Cuyos preceptos y educación me han ayudado a desarrollar mi persona. Por su amor que siempre ha estado presente en la realización de cada una de mis actividades como ser humano.

A mis hermanos Carlos Alberto, José Manuel y Laura Guadalupe, por su apoyo moral y los ánimos dados que siempre me impulsaron. A mi abuela Carmen ya que siempre se ha preocupado por animarme y darme su cariño.

En general a mi familia y a mis amigos que siempre han tenido confianza en el éxito de los proyectos que he emprendido.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, a mis hermanos y en general a mi familia por su valioso apoyo que nunca dejé de sentir por fuerte que fuera la adversidad.

Al Dr. Arturo Román Messina por su invaluable contribución al desarrollo de este proyecto y al de mi propia persona. Ya que sin sus consejos, sugerencias y recomendaciones este trabajo no hubiera visto la luz. Gracias Doctor por mostrar su calidad moral y el profesionalismo que traté de reflejar en este trabajo.

Al Dr. Claudio Rubén Fuerte Esquivel, cuyos comentarios y sugerencias fortalecieron y adecuaron este trabajo.

A los catedráticos que contribuyeron a mi formación, por la importancia de la enseñanza que han brindado a cada uno de los estudiantes del CINVESTAV.

A todos los compañeros con quienes conviví un poco más de dos años, en especial a mis amigos Ing. Ricardo Laguna Velasco, Ing. Jorge H. González Jiménez, M. C. Felipe A. Uribe Campos, M. C. Emilio Barocio Espejo, por su inigualable amistad.

Al CONACyT por el apoyo económico que me brindó y al CINVESTAV U. Guadalajara por las innumerables facilidades dadas que me permitieron la estancia y la conclusión de mis estudios.

INDICE GENERAL

| | |
|-------------------------|------------|
| RESUMEN | iii |
| DEDICATORIA | iv |
| AGRADECIMIENTOS | v |
| LISTA DE TABLAS | ix |
| LISTA DE FIGURAS | x |

CAPITULO 1

INTRODUCCION

| | | |
|------------|---|----------|
| 1.1 | MOTIVACION | 1 |
| 1.2 | REVISION DEL TRABAJO PREVIO | 3 |
| | 1.2.1 Análisis modal | 3 |
| | 1.2.2 Análisis de Estabilidad de voltaje mediante técnicas de descomposición en valor singular | 4 |
| | 1.2.3 Desarrollo de medidas correctivas ó de refuerzo del sistema | 5 |
| 1.3 | OBJETIVOS DE LA TESIS | 5 |
| 1.4 | APORTACIONES | 6 |
| 1.5 | CONTENIDO DE LA TESIS | 6 |

CAPITULO 2

FORMULACION BASICA DEL PROBLEMA DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN ESTADO ESTABLE

| | | |
|------------|---|-----------|
| 2.1 | INTRODUCCION | 8 |
| 2.2 | CONCEPTOS BÁSICOS | 8 |
| | 2.2.1 Modelo simplificado del SEP | 8 |
| | 2.2.2 Criterios básicos de estabilidad de voltaje | 9 |
| | 2.2.3 Uso del determinante de la matriz reducida como medida de estabilidad de voltaje | 11 |
| 2.3 | ANALISIS DE SENSIBILIDADES | 12 |
| | 2.3.1 Efecto de límites de potencia reactiva | 13 |
| 2.4 | MARGEN DE ESTABILIDAD | 14 |
| 2.5 | ANALISIS MODAL | 16 |
| | 2.5.1 Análisis de sensibilidades de eigenvalores | 17 |
| 2.6 | METODOS DE CONTINUACIÓN | 17 |

CAPITULO 3

MODELADO DEL SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.1 | INTRODUCCION | 21 |
| 3.2 | ANALISIS DE VALORES SINGULARES | 21 |
| 3.3 | FORMULACION DEL PROBLEMA DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE MEDIANTE LA TÉCNICA DE DVS | 23 |
| 3.3.1 | Modelo básico del SEP | 23 |
| 3.3.2 | Determinación de la condición de máxima cargabilidad | 24 |
| 3.3.3 | Identificación de los valores singulares dominantes | 25 |
| 3.3.4 | Identificación de áreas críticas y elementos con mayor participación en el (los) valor(es) singular(es) crítico(s) | 25 |
| 3.4 | MODELADO DEL SISTEMA DE POTENCIA PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN ESTADO ESTABLE | 26 |
| 3.4.1 | Representación de las características de la carga | 27 |
| 3.4.2 | Representación de dispositivos de control | 27 |
| 3.4.2.1 | Compensación estática de Vars | 28 |
| 3.4.2.2 | Elementos de compensación serie (CSCT) | 30 |
| 3.4.2.3 | Controlador Unificado de Flujo de Potencia (CUFP) | 31 |
| 3.5 | MODELO GLOBAL DEL SISTEMA DE POTENCIA | 33 |

CAPITULO 4

METODOLOGÍA DE LA DESCOMPOSICION EN VALORES SINGULARES Y LA OBTENCION DE RESIDUOS DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4.1 | INTRODUCCION | 35 |
| 4.2 | ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE VALORES SINGULARES | 35 |
| 4.3 | FORMULACION DEL PROBLEMA DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN TERMINOS DE VARIABLES DE ESTADO | 38 |
| 4.4 | UBICACIÓN DE DISPOSITIVOS DE FACTS | 39 |
| 4.4.1 | Transformación a un sistema equivalente | 39 |
| 4.4.2 | Modelo de orden reducido | 40 |
| 4.4.3 | Análisis de residuos | 41 |
| 4.4.4 | Análisis de controlabilidad de los modos críticos | 42 |
| 4.5 | ALGORITMO COMPUTACIONAL | 43 |

CAPITULO 5

APLICACION

| | | |
|------------|--|-----------|
| 5.1 | INTRODUCCION | 47 |
| 5.2 | ANALISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN UN SISTEMA SIMPLIFICADO | 47 |
| 5.2.1 | Descripción del sistema | 47 |
| 5.2.2 | Validación del programa computacional | 48 |
| 5.2.2.1 | Determinación de los elementos críticos del sistema | 48 |
| 5.2.2.2 | Determinación de ramas débiles | 50 |
| 5.2.2.3 | Determinación de la condición de máxima cargabilidad | 51 |
| 5.2.3 | Aplicación de medidas de refuerzo del sistema | 51 |
| 5.3 | ANALISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN UN SISTEMA REAL | 52 |
| 5.3.1 | Descripción del sistema de estudio | 52 |
| 5.3.2 | Determinación de la condición de máxima cargabilidad del sistema | 54 |
| 5.3.3 | Areas críticas de voltaje | 56 |
| 5.3.3.1 | Nodos críticos | 56 |
| 5.3.3.2 | Determinación de ramas débiles | 59 |
| 5.3.4 | Aplicación de medidas de refuerzo | 60 |
| 5.3.4.1 | Ubicación de dispositivos de control | 60 |
| 5.3.4.2 | Aplicación de medidas de refuerzo | 62 |
| 5.3.4.3 | Cálculo de márgenes de estabilidad | 65 |
| 5.3.5 | Curvas Q-V | 66 |

CAPITULO 6

CONCLUSIONES, APORTACIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

| | | |
|---------------------|--|-----------|
| 6.1 | CONCLUSIONES GENERALES | 70 |
| 6.2 | APORTACIONES | 71 |
| 6.3 | RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS | 71 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 73 |
| APÉNDICE A1 | | 77 |
| APÉNDICE A2 | | 78 |

| | | |
|--------------------|--|-----------|
| Tabla 4.1 | Aplicación del análisis de sensibilidad al análisis y desarrollo de medidas correctivas | 37 |
| Tabla 4.2 | Aplicación del análisis de residuos al problema de ubicación de dispositivos de FACTS | 42 |
| Tabla 5.1a | Comparación entre los valores propios y valores singulares obtenidos y los resultados descritos en [2] para el caso 1 de operación | 49 |
| Tabla 5.1.b | Comparación de resultados para el caso 2 de operación | 49 |
| Tabla 5.2 | Comparación de las técnicas de análisis lineal para el caso 1 de operación | 50 |
| Tabla 5.3 | Ramas débiles del sistema para el modo crítico identificadas mediante factores de participación y el análisis de sensibilidad para el caso 1 de operación | 50 |
| Tabla 5.4 | Modos críticos de voltaje para la condición de máxima cargabilidad mostrando los buses con mayor participación en los modos críticos | 51 |
| Tabla 5.5 | Comparación del efecto de la aplicación de dispositivos de control en los valores singulares de menor magnitud | 52 |
| Tabla 5.6 | Valores propios y valores singulares de menor magnitud | 55 |
| Tabla 5.7 | Elementos de voltaje del vector singular derecho correspondientes los valores singulares de menor magnitud | 57 |
| Tabla 5.8 | Factores de participación de rama (FP_R) asociados a los modos críticos de voltaje | 59 |
| Tabla 5.9 | Valores normalizados de las sensibilidades de los valores singulares con respecto al cambio en la reactancia serie de las ramas | 60 |
| Tabla 5.10 | Determinación de los buses con mayor influencia en los modos críticos de voltaje | 61 |
| Tabla 5.11 | Líneas identificadas por las diversas técnicas para el modo crítico del CCO | 62 |
| Tabla 5.12 | Efecto de la aplicación de CEVs y CSCT en los valores singulares críticos | 63 |
| Tabla 5.13 | Efecto de la aplicación de CUFP en los valores singulares críticos | 63 |
| Tabla 5.14 | Comparación del efecto de dispositivos de control | 63 |
| Tabla 5.15 | Efecto de las distintas compensaciones en la distribución de las zonas críticas | 65 |
| Tabla 5.16 | Impacto de dispositivos FACTS en la estabilidad de los modos críticos para el CCO | 66 |
| Tabla A1.1 | Datos de los nodos del sistema de prueba | 77 |
| Tabla A1.2 | Diferentes condiciones de operación del sistema de prueba | 77 |
| Tabla A1.3 | Datos de las ramas del sistema de prueba | 77 |
| Tabla A2.1 | Datos de los nodos del SIG | 78 |
| Tabla A2.2 | Datos de las ramas del SIG | 80 |

| | | |
|--------------------|--|-----------|
| Figura 2.1 | Representación simplificada del generador | 13 |
| Figura 2.2 | Curvas VQ como indicadores del margen de estabilidad | 14 |
| Figura 2.3 | Secuencia de los cálculos en el método de continuación de flujos de potencia | 19 |
| Figura 3.1 | Características de operación en estado estable de un CEV | 29 |
| Figura 3.2 | Representación del CSCT conectado en la línea de transmisión | 30 |
| Figura 3.3 | Representación del CSCT mediante inyecciones de potencia | 31 |
| Figura 3.4 | Diagrama esquemático de un CUFP | 32 |
| Figura 3.5 | Diagrama unifilar del modelo equivalente del CUFP en estado estable | 32 |
| Figura 3.6a | Localización del CUFP en el SEP | 33 |
| Figura 3.6b | Modelo del CUFP para el estudio de flujos de potencia | 33 |
| Figura 4.1 | Modelo equivalente del SEP para estudios de estabilidad de voltaje | 39 |
| Figura 4.2 | Diagrama de bloques del modelo del SEP de orden reducido incluyendo la representación de dispositivos de FACTS | 41 |
| Figura 4.3 | Diagrama de flujo del algoritmo computacional para el análisis de estabilidad de voltaje en estado estable y la implementación de medidas correctivas | 46 |
| Figura 5.1 | Sistema de prueba de tres generadores [2] | 48 |
| Figura 5.2 | Diagrama unifilar del sistema de estudio | 53 |
| Figura 5.3 | Comparación del comportamiento del valor singular y el valor propio mínimo para la matrices J y J_R^Q | 55 |
| Figura 5.4. | Gráfico del perfil de voltaje del sistema para la condición de máxima cargabilidad | 56 |
| Figura 5.5 | Gráfico de las áreas asociadas a los nodos con mayor participación en los modos críticos | 58 |
| Figura 5.6 | Gráfico del vector singular derecho asociado a los valores singulares 1 y 2 | 59 |
| Figura 5.7 | Gráfico del subvector v_v para las diferentes alternativas de control | 64 |
| Figura 5.8 | Magnitud de los residuos asociados a las zonas críticas | 65 |
| Figura 5.9 | Curvas P-V para los nodos con mayor participación en el modo crítico | 67 |
| Figura 5.10 | Curvas V-Q para los nodos con mayor participación en el modo crítico | 68 |
| Figura 5.11 | Curvas V-Q para el bus 4103 mostrando el aumento en el margen de estabilidad | 69 |
| Figura 5.12 | Curvas P-V para el nodo 4103 ante la salida de una línea | 69 |

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

La estabilidad de voltaje se relaciona, de manera amplia, con la capacidad del sistema para mantener niveles aceptables de voltaje en todos los nodos del sistema bajo condiciones normales de operación o después de la ocurrencia de un disturbio [1]. El sistema entra a una condición de inestabilidad o de colapso cuando en un disturbio, el incremento en la demanda o un cambio en las condiciones del sistema, causan una caída progresiva e incontrolable de voltaje [2,3].

En los últimos años, la presencia de problemas asociados al control de voltaje ha aumentado en forma considerable debido a una diversidad de factores. Así por ejemplo, el consumo de energía se ha incrementado en muchos casos más rápido de lo previsto. Por otra parte, las políticas actuales de diseño y operación de los sistemas de potencia dificultan la adquisición de derechos de vía para nuevos enlaces de transmisión y propician una mejor utilización de la red eléctrica. El efecto combinado de estos factores ha conducido a una reducción en los márgenes de estabilidad de muchos sistemas eléctricos.

El análisis de varios eventos en distintas redes eléctricas muestra que el fenómeno de estabilidad de voltaje puede manifestarse de maneras distintas, que pueden ser de naturaleza dinámica y/o de estado estable [4]. En algunos casos, la pérdida de estabilidad se manifiesta después de alguna contingencia en el sistema, principalmente la salida de operación de una línea de transmisión. En otros casos, sin embargo, la pérdida de cantidades significativas de soporte de voltaje, por ejemplo asociados a compensación estática de VARs, puede también conducir a la pérdida de estabilidad angular y de voltaje [1,5].

El colapso de voltaje se caracteriza por una caída progresiva en las magnitudes de voltaje en nodos del sistema. Este fenómeno puede tomar distintas formas y períodos de tiempo. Frecuentemente, los ángulos de fase y la frecuencia del sistema permanecen constantes y el fenómeno de inestabilidad se manifiesta fundamentalmente por la disminución incontrolable del voltaje del sistema, a menudo en un período largo de tiempo causando la operación de equipo de protección. En la etapa inicial, la magnitud de voltaje en los nodos críticos del sistema decae lentamente. La acción de los sistemas automáticos de control puede en algunos casos mejorar en periodos cortos de tiempo los perfiles de voltaje para posteriormente decrecer en forma incontrolable causando la operación de equipo de protección. Esta forma de inestabilidad se asocia con frecuencia con la acción o respuesta lenta del equipo de control secundario de voltaje, esencialmente la acción de transformadores con cambio automático de relación de transformación con carga, la

conexión de bancos de capacitores y la naturaleza de la carga [6]. Este fenómeno es frecuentemente descrito en la literatura como la estabilidad de voltaje en estado estacionario para distinguirlo de otras manifestaciones de la inestabilidad [7].

Ejemplos notables de este tipo de inestabilidades incluyen el evento de Tokio en 1987, el cual se presentó en un espacio de tiempo del orden 30 minutos antes de causar el colapso del sistema [2,8]. Otros eventos de esta naturaleza incluyen el colapso de voltaje en Francia, y más recientemente en Brasil [9]. El evento de Francia es particularmente interesante debido a que durante la etapa de restauración del sistema, una vez que se manifiesta la inestabilidad, se presenta un segundo evento de colapso; el fenómeno en este caso se presentó en un lapso de alrededor de 4 horas.

Los principales síntomas asociados a la presencia de inestabilidad en estado estacionario incluyen niveles bajos de tensión en la condición de predisturbio, la operación del sistema con la pérdida de los elementos principales de transmisión o control de voltaje, la falta de soporte adecuado de potencia reactiva en las zonas críticas del sistema y un nivel elevado de transmisión de potencia [1,10]. Una vez que se inicia el fenómeno, las medidas correctivas o de emergencia que han mostrado algún grado de efectividad son limitadas e incluyen: el corte de carga sistemático en nodos dominantes del sistema, la conexión de bancos de capacitores y el bloqueo de la acción de transformadores con cambio automático de derivación [11]. Por estas razones, en la actualidad se desarrollan esfuerzos importantes en las áreas de prevención del fenómeno incluyendo políticas de operación y planeación que tomen en cuenta el problema.

En la última década, los eventos de inestabilidad se han presentado de manera recurrente en diversos sistemas eléctricos motivando la creación de grupos especializados o fuerzas de tarea con la finalidad de revisar los criterios de planeación y operación de los sistemas. La importancia de este fenómeno motivó recientemente al Western Systems Coordinating Council (WSCC) en los Estados Unidos al desarrollo de un estudio motivado por los fenómenos de inestabilidad de voltaje en Estados Unidos. En este documento se identifican los aspectos críticos para el análisis y prevención del fenómeno, y se proponen una serie de recomendaciones a las compañías integrantes destinadas a la prevención y mejoramiento de las estrategias de corrección del problema [12]. Esfuerzos similares se están llevando a cabo en distintos países [4,9].

El análisis de la estabilidad de voltaje es un problema extremadamente complicado, con características propias que lo diferencian de otras áreas de estudio de los sistemas eléctricos de potencia. La determinación de la técnica más conveniente a utilizar depende de las necesidades del problema y de la escala de tiempo de interés.

El análisis dinámico proporciona información sobre la interacción de elementos tales como controles cambiadores de fase, transformadores cambiadores de taps, motores, etc. La principal desventaja de esta técnica, es la gran cantidad de recursos computacionales que requiere y la falta de capacidad para proporcionar márgenes o medidas de la inestabilidad del sistema.

Por otra parte, las técnicas de análisis en estado estacionario permiten reconocer la participación cuantitativa de elementos del sistema tales como generadores, líneas de transmisión, nodos y dispositivos de compensación en el mecanismo que lleva a la inestabilidad, además de que computacionalmente requiere de pocos recursos. Este tipo de enfoques tienen su principal aplicación en el estudio de problemas de voltaje de mediano o largo plazo. La información de interés incluye el análisis de modos críticos de voltaje, la identificación de los elementos de la red, generadores y dispositivos de control que participan en cada modo.

En este trabajo se presenta una metodología integral para el análisis de estabilidad de voltaje en estado estacionario, así como el desarrollo de medidas correctivas basadas en la aplicación sistemática de dispositivos de FACTS.

1.2 REVISION DEL TRABAJO PREVIO

Los primeros esfuerzos sistemáticos para derivar índices o medidas analíticas para detectar la inestabilidad de voltaje se desarrollan en la década de los 60's. Venikov propone en 1961 [13], lo que se considera la primera metodología para el análisis de estabilidad de voltaje en estado estacionario, basada en el uso de programas convencionales de flujos de potencia, al sugerir un indicador de estabilidad para un sistema de dos nodos. Posteriormente en [14] demuestra que el signo del determinante de la matriz Jacobiana puede utilizarse para el estudio de la estabilidad de un sistema multinodal. Abe et al., modificaron el trabajo de Venikov, al utilizar primero la dependencia de voltaje en cargas no lineales y demostrando que el modelo de carga más crítico es el de potencia constante [15] y proponiendo después un método para el cálculo de las condiciones iniciales para el estudio de flujos de un sistema que opera muy cerca de la vecindad del límite de estabilidad de voltaje y asegurar la convergencia en el límite del punto de colapso.

Se han propuesto también índices de estabilidad de voltaje basados en la solución previa de flujos de potencia: Borremans en [16], Carpentier en [17] mediante estudios de flujos óptimos de potencia y Kessel y Glavitch en [18]. Estos enfoques, sin embargo, presentan el inconveniente de que al no lograr convergencia en algún caso específico, no se pueden calcular los índices propuestos.

Todos los anteriores desarrollos se limitan a informar si el sistema es estable, sin ofrecer una perspectiva general del fenómeno de estabilidad. En este sentido, una de las primeras metodologías de uso práctico para obtener márgenes de estabilidad fue propuesto por Flatabø [19] con base en el análisis de sensibilidad de las ecuaciones de flujos de potencia.

Estas metodologías presentan la restricción de no poder analizar los fenómenos no lineales que se presentan en el fenómeno. En este sentido son destacables las aportaciones hechas por Dobson [20] y Cañizares [21] quienes han investigado los mecanismos de naturaleza no lineal que conducen a la inestabilidad.

1.2.1 Análisis modal

La aplicación de técnicas de análisis modal al problema de la estabilidad de voltaje fue inicialmente propuesta en [22] y posteriormente modificada en [23-27], para el estudio de la estabilidad de voltaje en sistemas complejos incluyendo la representación de dispositivos avanzados de control. El análisis modal incluye básicamente tres etapas: 1) La determinación de los modos críticos de voltaje para la condición de máxima cargabilidad del sistema, 2) La determinación de los elementos con mayor influencia en el fenómeno, específicamente ramas, nodos y fuentes de potencia reactiva, y 3) El desarrollo de medidas correctivas o de refuerzo del sistema.

Los algoritmos y modelos desarrollados con base en esta técnica son eficientes, y permiten el estudio de redes de prácticamente cualquier dimensión. Por otra parte este tipo de enfoques proporcionan una visión global del problema de inestabilidad y pueden ayudar a comprender las características de operación o de estructura del sistema que inicien un evento de inestabilidad. Otras características de interés en este tipo de metodología incluyen la posibilidad de correlacionar los estudios en estado estable con los estudios dinámicos, particularmente en aquellos basados en estudios de estabilidad transitoria.

Los algoritmos de análisis basados en el análisis modal presentan, sin embargo, limitaciones importantes que han impedido su aceptación generalizada para el estudio de la estabilidad de voltaje. Entre otros cabe destacar los siguientes:

- La derivación del modelo del sistema asume simplificaciones que pueden afectar la exactitud de los resultados.
- El análisis modal proporciona varios modos de voltaje. La experiencia con el estudio de sistemas complejos muestra que no siempre es posible separar el fenómeno de inestabilidad angular de la estabilidad de voltaje.
- Los algoritmos para ubicar dispositivos de control se basan principalmente en la utilización de conceptos heurísticos derivados de modelos del sistema utilizados en otras áreas de estudio. Con estos enfoques no es posible determinar en forma precisa el efecto de elementos de control de lazo cerrado o el potencial de interacción entre dispositivos de control.

1.2.2 Análisis de estabilidad de voltaje mediante técnicas de descomposición en valor singular

En paralelo con el desarrollo de técnicas de análisis modal, ha habido un desarrollo importante en la aplicación de la teoría de sistemas lineales al estudio de las ecuaciones de flujos de potencia. En [28] el uso del valor singular mínimo de la matriz Jacobiana fue propuesto como un índice de seguridad de voltaje. Posteriormente, Hill y Anderson proponen un indicador de estabilidad utilizando el mínimo valor singular de la matriz Jacobiana [29]. Otros avances propuestos incluyen la representación de límites en generadores [30] y la aplicación de procedimientos de análisis de estabilidad basados en la utilización coordinada de análisis de sensibilidades y valores singulares [31]

La técnica de la descomposición en valores singulares presenta además de la robustez numérica, la información de las entradas de los vectores singulares derecho e izquierdo respecto de la localización de zonas problemáticas y de los cambios en las potencias activa y reactiva mas críticos.

Recientemente, Ekwue et al. [32] han propuesto una técnica para calcular un margen de colapso de voltaje combinando el análisis de la descomposición en valores singulares con el análisis de sensibilidades en [19]. Otros enfoques basados en esta estrategia incluyen la aplicación de conceptos de controlabilidad y observabilidad al problema de la ubicación de controles [33] y el análisis del débil condicionamiento en la matriz Jacobiana [34]

1.2.3 Desarrollo de medidas correctivas o de refuerzo del sistema

El desarrollo de metodologías sistemáticas para la ubicación de dispositivos de control ha recibido atención en los últimos años. Una vez que se determina que un sistema requiere soporte de potencia reactiva, el problema fundamental es la ubicación y composición de la fuente de soporte de potencia (estática o dinámica) [33]. La deficiencia de potencia reactiva puede ser resuelta mediante varias opciones tales como la construcción de nuevas líneas de transmisión, la instalación de generación ó mediante dispositivos de control basados en esquemas flexibles de transmisión en corriente alterna [12] (FACTS por sus siglas en la literatura de habla Inglesa).

En [24,25] Kundur et al abordaron el problema de ubicación de Compensadores Estáticos de VAr (CEVs) usando factores de participación nodal derivados del análisis modal de las ecuaciones de flujo de potencia en un sistema real. De manera similar, Xu et al consideraron el problema de ubicación de CEVs con herramientas analíticas semejantes. Los resultados obtenidos mostraron que la mejor ubicación para instalar CEVs es el centro del área crítica determinada por el estudio de los factores de participación. En [35], la ubicación de dispositivos de control se presenta el análisis de manera general para varios controladores de características distintas, mediante el análisis de residuos de la función de transferencia entre voltajes terminales y la susceptancia de compensación utilizando un programa modificado de estabilidad de pequeña señal.

Más recientemente, el análisis de valores singulares de un modelo equivalente del sistema de potencia basado en relaciones incrementales ha sido aplicado al problema de ubicación de CEVs y Controladores Unificados de Flujo de Potencia (CUFP) [33].

1.3 OBJETIVOS DE LA TESIS

El principal objetivo de esta tesis es el desarrollo de un procedimiento sistemático para el análisis y control de la estabilidad de voltaje en estado estable, basado en la utilización de técnicas de análisis lineal.

Para lograr este objetivo, se propone una metodología basada en la derivación de un modelo ficticio equivalente en espacio de estado a partir del modelo convencional de las ecuaciones linealizadas de flujos de potencia, para poder determinar el impacto que tendría

un dispositivo en la red, en función de alguno de los parámetros del mismo, ya sea la reactancia o la susceptancia.

1.4 APORTACIONES

Se considera que las principales aportaciones de este trabajo son las siguientes:

- El desarrollo de una metodología de uso práctico con la capacidad de analizar la estabilidad de voltaje en estado estable en un sistema eléctrico de potencia, así como la identificación de los mecanismos que conducen a la inestabilidad y el desarrollo de medidas de refuerzo del sistema basadas en la aplicación de dispositivos de control
- La obtención de un modelo ficticio equivalente en el espacio de estado a partir del modelo convencional de las ecuaciones linealizadas de flujos de potencia, el cual puede incluir los efectos de los parámetros de dispositivos de control en la estabilidad del sistema
- La inclusión generalizada de dispositivos de control en la metodología propuesta
- La implementación de la metodología propuesta en un programa de simulación digital para el estudio de estabilidad de voltaje

El desarrollo del presente trabajo ha permitido la publicación de los siguientes artículos:

- M. A. Pérez, A. R. Messina, C R Fuerte-Esquivel, "*Application of FACTS Devices to Improve Steady State Voltage Stability*", IEEE Power Summer Meeting, Seattle, WA. July 16-20, 2000, paper SM-25698.
- A. R. Messina, M. A. Pérez, E. Hernández, C R Fuerte-Esquivel, "*Co-ordinated Use of FACTS Devices To Enhance Steady-State Voltage Stability*", enviado para su revisión y probable publicación en International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Elsevier Science Ltd.

1.5 CONTENIDO DE LA TESIS

La estructura general de esta tesis es la siguiente: En el capítulo 2 se presenta una revisión de los diferentes enfoques para el análisis de la estabilidad de voltaje en estado estacionario. Se presentan una comparación de las principales características de los métodos de estudios en el contexto de su aplicación a redes eléctricas con características reales.

En el capítulo 3 se describe la formulación de las técnicas de Descomposición en Valores Singulares (DVS) y el análisis modal de las ecuaciones de flujos de potencia para el análisis de la estabilidad y la identificación de los elementos con mayor participación en el fenómeno. Se derivan modelos de dispositivos de control para su utilización en la técnica de DVS y se propone un modelo generalizado del SEP a partir de relaciones incrementales.

En el capítulo 4 se propone una estrategia generalizada para ubicar dispositivos de control basada en el análisis de sensibilidades y en el estudio de funciones de transferencia y el análisis de controlabilidad. Se deriva un modelo ficticio en espacio de estados, en el cual es posible la representación de estos dispositivos.

Los resultados de la implementación de la metodología propuesta, se presentan y se discuten en el capítulo 5, para un sistema de prueba de tres generadores y para un sistema eléctrico real de 33 generadores.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones generales del trabajo y la recomendación para trabajos futuros.

FORMULACION BASICA DEL PROBLEMA DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN ESTADO ESTABLE

2.1 INTRODUCCION

El análisis de la estabilidad de voltaje en estado estacionario se basa en la suposición de que el comportamiento del sistema puede describirse dado un punto de operación en estado estable y que los parámetros del sistema cambian de manera lenta y continua. Con estas consideraciones, el comportamiento del sistema puede analizarse de manera satisfactoria mediante enfoques de análisis en estado estacionario. Este tipo de modelos tienen su principal aplicación en el estudio de la estabilidad de voltaje ante disturbios pequeños asociada a variaciones lentas en la carga del sistema.

En este capítulo se presenta una revisión de los conceptos básicos relacionados con la estabilidad de voltaje, así como los métodos clásicos más usados para el análisis y corrección de estos mecanismos que conducen a la inestabilidad. Se discuten las principales limitaciones de los diferentes enfoques desde el punto de vista de su utilización para el estudio de sistemas de gran dimensión.

2.2 CONCEPTOS BASICOS

2.2.1 Modelo simplificado del SEP

Las ecuaciones que describen el balance de potencia nodal son:

$$\tilde{S}_k = \mathbf{P}_k + j\mathbf{Q}_k = \tilde{V}_k \tilde{I}_k^* \quad k = 1, \dots, n \quad (2.1)$$

en donde \mathbf{P}_k y \mathbf{Q}_k representan la potencia activa y reactiva inyectadas al nodo k y n es el número de nodos del sistema. Separando en partes real e imaginaria se tiene:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_k &= \mathbf{P}_{g^k} - \mathbf{P}_{l^k} = f_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = V_k \sum_{m=1}^n (G_{km} V_m \cos\theta_{km} + B_{km} V_m \sin\theta_{km}) \\ \mathbf{Q}_k &= \mathbf{Q}_{g^k} - \mathbf{Q}_{l^k} = g_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = V_k \sum_{m=1}^n (G_{km} V_m \sin\theta_{km} - B_{km} V_m \cos\theta_{km}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$k = 1, \dots, n$$

en donde:

P_{gk}, Q_{gk} = Potencia activa y reactiva generada en el nodo k

P_{lk}, Q_{lk} = Potencia activa y reactiva de carga en el nodo k

Los coeficientes G_{km} y B_{km} representan, respectivamente, la conductancia y susceptancia del enlace de transmisión; θ_{km} es el ángulo de fase entre los nodos k y m .

Expandiendo (2.2) alrededor de una condición de equilibrio estable se obtiene [36]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{P\theta} & \mathbf{J}_{PV} \\ \mathbf{J}_{Q\theta} & \mathbf{J}_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

en donde \mathbf{J} es la matriz Jacobiana que relaciona los cambios en la magnitud y fase de los voltajes nodales producidos por los cambios en las inyecciones de potencias activa y reactiva. Para un sistema de n nodos, la matriz \mathbf{J} es cuadrada, de dimensión $k \times k$ donde $k = 2n - n_g - 1$ y n_g es el número de nodos de voltaje controlado. Las submatrices $\mathbf{J}_{P\theta}$, \mathbf{J}_{PV} , $\mathbf{J}_{Q\theta}$ y \mathbf{J}_{QV} en (2.3) representan relaciones de sensibilidad apropiadas.

Si la matriz de admitancias de red es simétrica y se desprecia la resistencia en líneas de transmisión y transformadores, se puede mostrar que la matriz \mathbf{J} es prácticamente simétrica [1]. Por otra parte, la dispersidad de cada submatriz del Jacobiano, es la misma que la de la matriz de admitancias nodales.

Resolviendo para la magnitud y fase de los voltajes en nodos de carga se tiene:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

La ecuación (2.4) permite estimar el efecto de un cambio en la demanda de potencia activa y reactiva sobre los niveles de tensión del sistema. Su utilización como herramienta de análisis de la estabilidad de voltaje se describe a continuación.

2.2.2 Criterios básicos de estabilidad de voltaje

La diferencia más notable entre los diferentes métodos de análisis de estabilidad de voltaje, se encuentra en la forma de determinar el margen de estabilidad o el punto crítico. Por su interés y relación con este trabajo, a continuación se describen brevemente algunos de los principales métodos utilizados para su estudio.

El punto de colapso de voltaje se define comúnmente como el punto de operación en la curva Q-V o V-P para el cual la matriz Jacobiana del problema de flujos de potencia es singular [37]. Una primera aproximación al análisis de estabilidad de voltaje puede

obtenerse al asumir un acoplamiento débil en las ecuaciones de potencia activa y reactiva, tal que $\mathbf{J}_{PV} \approx \mathbf{0}$ y $\mathbf{J}_{Q\theta} \approx \mathbf{0}$.

Esta simplificación conduce al modelo desacoplado $\Delta \mathbf{V} \approx (\mathbf{J}_{QV})^{-1} \Delta \mathbf{Q}$. En este contexto, una mejor aproximación al estudio de este fenómeno de estabilidad de voltaje se obtiene al asumir que para el punto de operación considerado, \mathbf{P} es constante, o bien, que el cambio en la potencia activa es independiente de la variación en la magnitud de voltaje [35]. Por consiguiente, el comportamiento del sistema estará determinado por las ecuaciones [22,38]:

$$\Delta \mathbf{Q} = [\mathbf{J}_{QV} - \mathbf{J}_{Q\theta} \mathbf{J}_{P\theta}^{-1} \mathbf{J}_{PV}] \Delta \mathbf{V} = \mathbf{J}_R^Q \Delta \mathbf{V} \quad (2.4)$$

y

$$\Delta \theta = -\mathbf{J}_{P\theta}^{-1} \mathbf{J}_{PV} \Delta \mathbf{V} \quad (2.5)$$

en donde la matriz \mathbf{J}_R^Q es la matriz Jacobiana reducida, de dimensión $nc=n-ng$ definida por la relación

$$\mathbf{J}_R^Q = \mathbf{J}_{QV} - \mathbf{J}_{Q\theta} (\mathbf{J}_{P\theta})^{-1} \mathbf{J}_{PV} \quad (2.6)$$

Resolviendo (2.4) para los voltajes terminales se obtiene

$$\Delta \mathbf{V} = (\mathbf{J}_R^Q)^{-1} \Delta \mathbf{Q} \quad (2.7)$$

La matriz $(\mathbf{J}_R^Q)^{-1}$ indica, para una condición específica de operación, la sensibilidad de los voltajes nodales al cambio en la demanda de potencia reactiva. En esta relación, el segundo término en (2.6) es de particular interés bajo condiciones de estrés asociados a un elevado flujo de potencia real y reactiva en la red y puede verse como un término de corrección al modelo desacoplado. La suposición implícita es que la matriz $\mathbf{J}_{P\theta}$ no es singular, o bien que el sistema no exhibe problemas de estabilidad angular en estado estacionario.

Los elementos de la matriz $(\mathbf{J}_R^Q)^{-1}$ tienen la siguiente interpretación física:

- El i -ésimo elemento diagonal de $(\mathbf{J}_R^Q)^{-1}$ representa la sensibilidad V-Q en el bus i ($\partial V_i / \partial Q_i$). En el punto de singularidad el valor numérico de estas sensibilidades tiende a un valor infinito
- El sistema es estable en el sentido de voltaje si para un incremento en la potencia de carga todos los voltajes disminuyen. Esto es,

$$\frac{\partial V_j}{\partial Q_k} < 0 \quad \text{para toda } j, k \quad (2.8)$$

En este sentido, un sistema es inestable si al menos un nodo es inestable [39,40]. Cabe señalar que este concepto es esencialmente válido para la operación en la parte superior de

la curva Q-V. Otros estudios muestran, sin embargo, que el comportamiento del sistema en la parte inferior de la curva Q-V ante corte de carga ó la inserción de bancos de capacitores es opuesto al que se predice mediante el análisis en estado estable [41].

Para el análisis de estabilidad, el determinante de la matriz jacobiana puede expresarse en la forma de Schur como [42]:

$$\det \mathbf{J} = \det \mathbf{J}_{p\theta} \det \mathbf{J}_R^Q \quad (2.9)$$

Si se asume que la matriz $\mathbf{J}_{p\theta}$ no es singular, el fenómeno de estabilidad de voltaje se reduce al estudio de la matriz Jacobiana reducida. Este criterio es utilizado por diferentes investigadores como criterio básico de estabilidad [22],[43].

2.2.3 Uso del determinante de la matriz reducida como medida de estabilidad de voltaje

Una de las aplicaciones más interesantes del análisis de Schur es la identificación rápida de nodos con problemas de estabilidad. Considere que se desea analizar la estabilidad de voltaje del nodo i . Las ecuaciones de flujo de potencia pueden expresarse en la forma modificada [5]:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{V} \\ \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

en donde los vectores modificados \mathbf{P} y \mathbf{Q} son de dimensión $n-2$ y $nc=n-ng$ respectivamente y P_i , Q_i representa la potencia neta asociada al bus en estudio; la submatriz \mathbf{D} de dimensión 2×2 esta asociada en el balance de potencia real y reactiva para el i -ésimo nodo.

Siguiendo un proceso similar a la relación (2.5), el Jacobiano del sistema puede entonces expresarse en la forma

$$\det \mathbf{J} = \det \mathbf{A} \cdot \det (\mathbf{D} - \mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}) \quad (2.11)$$

La ecuación (2.11) muestra que cuando la condición de inestabilidad de voltaje o angular se asocia al nodo i , el cambio de signo o la proximidad a cero del determinante de la matriz \mathbf{J} puede determinarse del estudio de la matriz $(\mathbf{D}-\mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})$: El sistema es estable en el sentido de voltaje sí

$$\det (\mathbf{D}-\mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}) > 0.$$

La aplicación sistemática del método anterior a cada nodo de carga permite evaluar en forma eficiente la estabilidad de voltaje de manera local para redes de cualquier dimensión. El método descrito es simple y computacionalmente eficiente. Los resultados son exactos si la inestabilidad de voltaje o la estabilidad angular se presentan en un solo nodo del sistema.

2.3 ANALISIS DE SENSIBILIDADES

Considere que las ecuaciones incrementales del sistema en (2.3) se describen en la forma [43]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q_g \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{P\theta} & \mathbf{J}_{PVg} & \mathbf{J}_{PV} \\ \mathbf{J}_{Qg\theta} & \mathbf{J}_{QgVg} & \mathbf{J}_{VgV} \\ \mathbf{J}_{Q\theta} & \mathbf{J}_{QVg} & \mathbf{J}_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \mathbf{V}_g \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

en donde:

$\Delta \mathbf{V}_g$ = Vector de cambios incrementales en las magnitudes de voltajes en nodos de voltaje controlado

ΔQ_g = Vector de cambios incrementales en la inyección de potencia reactiva en nodos de voltaje controlado

Asumiendo que $\Delta P=0$ y resolviendo para la generación de potencia reactiva en generadores y CEVs se obtiene:

$$\Delta Q_g = \mathbf{S}_{QgQ} \Delta Q + \mathbf{S}_{QgVg} \Delta \mathbf{V}_g \quad (2.13)$$

y

$$\Delta \mathbf{V} = (\mathbf{J}_R^Q)^{-1} \Delta Q + \mathbf{S}_{VVg} \Delta \mathbf{V}_g \quad (2.14)$$

en donde:

$$\mathbf{S}_{QgQ} = \left[\mathbf{J}_{QgV} - \mathbf{J}_{QgV} (\mathbf{J}_{P\theta})^{-1} \mathbf{J}_{PV} \right] (\mathbf{J}_R^Q)^{-1} \quad (2.15)$$

y

$$\mathbf{S}_{VVg} = (\mathbf{J}_R^Q)^{-1} \left[\mathbf{J}_{Q\theta} \mathbf{J}_{P\theta}^{-1} \mathbf{J}_{PVg} - \mathbf{J}_{QgVg} \right] \quad (2.16)$$

La relación \mathbf{S}_{QgQ} representa la sensibilidad de la potencia reactiva de generación en máquinas síncronas, CEVs y otras fuentes de potencia reactiva al cambio en el nivel de demanda de potencia reactiva.

En general, en la presencia de fuentes de generación de potencia reactiva se requiere:

$$\sum_{i=1}^{ng} \left[S_{QgVg^{ij}} \right] \geq 0, \quad \text{al menos para un } j, \quad 1 \leq j \leq ng \quad (2.17)$$

y que la matriz \mathbf{S}_{QgQ} sea positiva.

En la cercanía al punto de colapso de voltaje, la sensibilidad alcanza un valor infinito por lo que su magnitud se ha utilizado como un indicador del margen de estabilidad.

El razonamiento físico detrás de esta suposición es el siguiente. Asuma que se desean estudiar los problemas de voltaje de un área física del sistema caracterizada por escasas fuentes de soporte de voltaje y que además estas se encuentran cerca de sus límites nominales.

- Al aumentar la demanda, aumenta el flujo de potencia reactiva en los enlaces que unen esta área con otras partes del sistema causando mayores pérdidas de potencia reactiva, precipitando el fenómeno de inestabilidad.
- La aproximación de interés que define de manera aproximada la pérdida de estabilidad es aquella cuando todos los generadores del área alcanzan sus límites de operación

Debe observarse, sin embargo, que el punto de colapso de voltaje no necesariamente coincide con el punto de operación en que se agotan las reservas de potencia reactiva por lo que este enfoque solo permite obtener una aproximación al límite de estabilidad; el comportamiento de las fuentes de potencia reactiva tiene un papel importante en la ocurrencia del fenómeno.

2.3.1 Efecto de límites de potencia reactiva

En estudios convencionales de estabilidad de voltaje se asume generalmente que el voltaje en terminales de los generadores permanece constante ($\Delta V_g=0$) conduciendo a modelos simplificados. Para comprender el efecto de un generador en el problema de estabilidad se utiliza el circuito equivalente en la Figura 2.1.

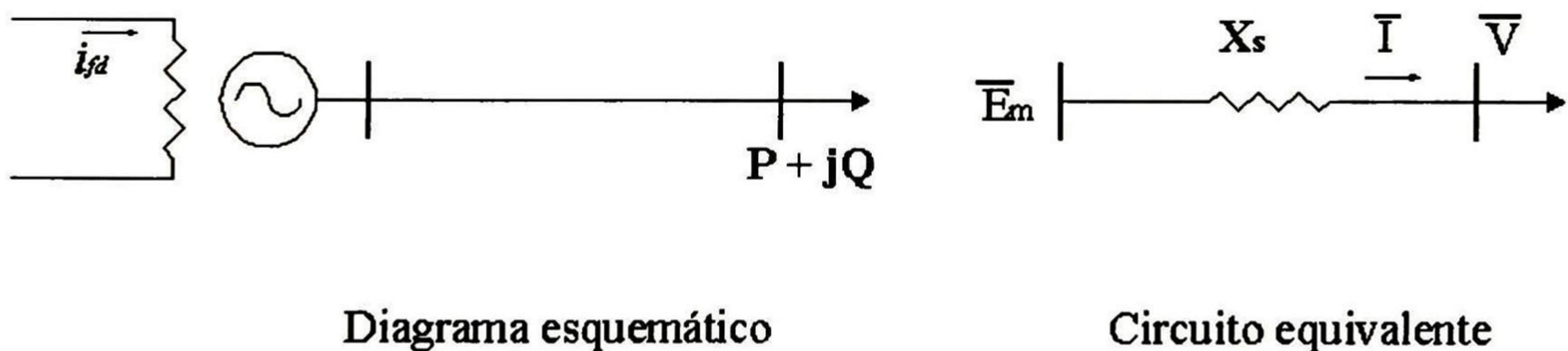


Figura 2.1. Representación simplificada del generador para estudios de estabilidad de voltaje

La capacidad de potencia reactiva del generador esta determinada por límites operacionales en la corriente de campo y la corriente de armadura [44,45]. En la cercanía al colapso de voltaje, cuando un generador alcanza sus límites de operación, el generador opera con excitación constante. La potencia reactiva del generador puede expresarse en forma aproximada como [44]:

$$Q = \sqrt{\left(\frac{E_m}{X_s} V\right)^2 - P^2} - \frac{V^2}{X_s} \quad (2.18)$$

La ecuación (2.18) proporciona la relación de sensibilidad de interés en el modelo (2.12). Para algunas condiciones de operación, la sensibilidad ($\partial Q/\partial V$) puede ser igual a cero (nodo PV) o diferente de cero, mostrando que el generador puede entregar potencia reactiva de manera pasiva en función del voltaje en terminales. Criterios similares se obtienen cuando la limitación del generador es debida al límite térmico en la corriente de armadura.

2.4 MARGEN DE ESTABILIDAD

Los dos márgenes más utilizados para medir la distancia a la inestabilidad son: la distancia en MVar y la distancia en kV al colapso de voltaje. La distancia en MVar al punto de colapso se define como la carga en MVar que puede incrementarse a un nodo para que el sistema llegue a la condición de inestabilidad [6]. El margen de estabilidad depende de la condición inicial de operación, las características de la carga y la presencia de perturbaciones en el sistema como se muestra en la figura 2.2.

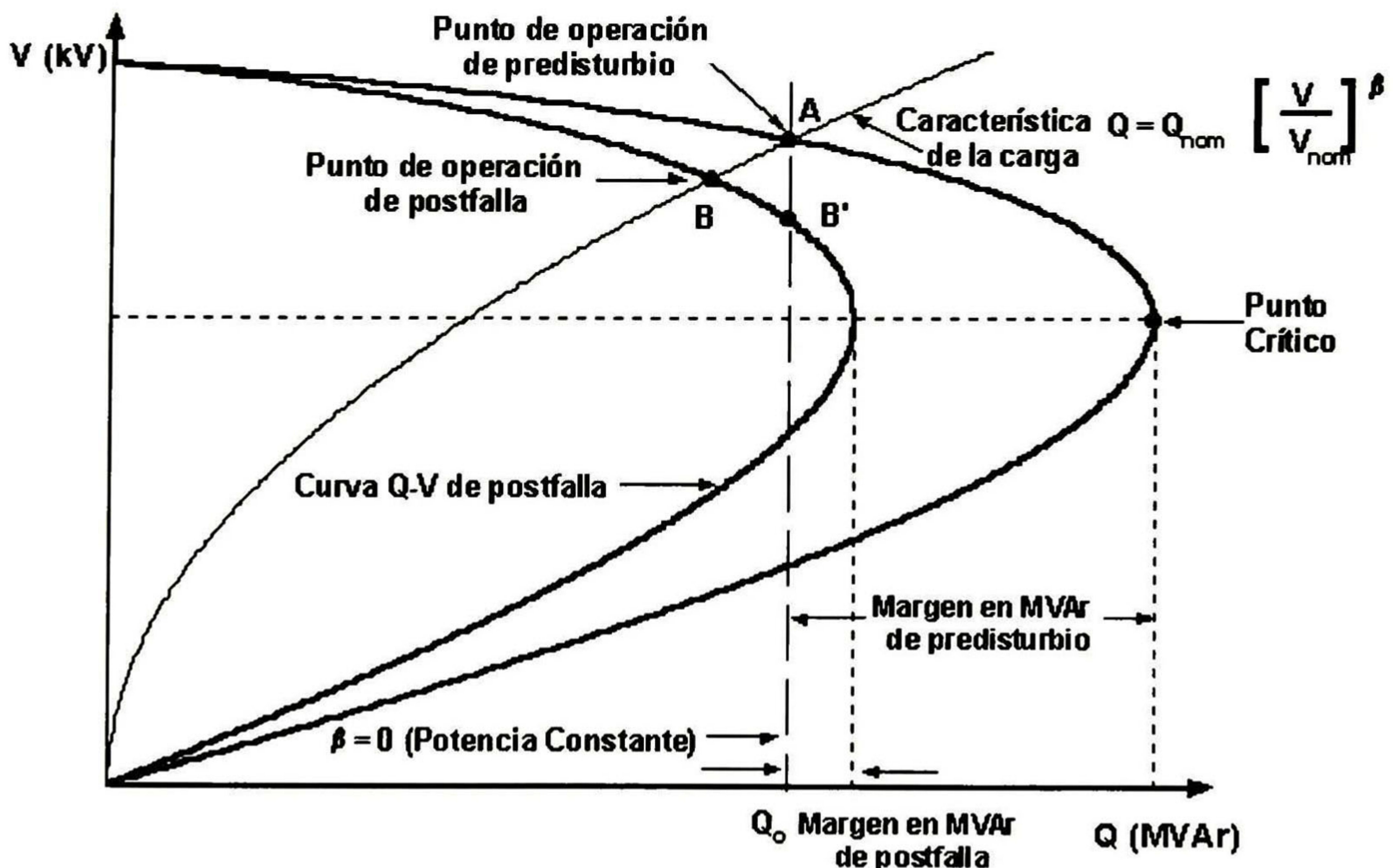


Figura 2.2.- Curvas VQ como indicadores del margen de estabilidad

El cálculo del margen de estabilidad puede formularse como un problema de optimización no lineal:

$$\text{Maximizar } \left\{ \sum_{j=1}^{nc} \Delta Q_j \right\}$$

sujeto a:

- a) El patrón especificado de demanda
- b) Los límites de operación en generadores, transformadores y otros dispositivos de control
- c) Las restricciones de balance de potencia en (2.2)

En este enfoque de análisis, se asume que el límite de estabilidad ocurre para la condición de carga máxima que el sistema puede proporcionar. El cálculo se efectúa de manera iterativa: en el n-ésimo paso se busca el valor mínimo que una carga ΔQ_i puede ser añadida antes de que cualquier generador exceda sus límites de operación. Una vez que se alcanza este valor mínimo, se actualizan los valores de los voltajes, ángulos, generación de MVar y la generación del nodo de compensación debido al cambio en ΔQ_i . La expresión para ΔQ_i es [19,46]:

$$\Delta Q_i^n = \min_j \left[\frac{(Q_{jmax} - Q_j)}{\partial Q_g / \partial Q_i} \right] \quad (2.19)$$

El proceso se repite, modificando las matrices de sensibilidad hasta que otro generador alcance sus límites y así sucesivamente hasta que se alcance la condición de inestabilidad. La distancia en MVar al punto de colapso se expresa como:

$$\Delta Q_{ic} = \sum_{n=1}^{n_{max}^i} \Delta Q_i^n \quad (2.20)$$

De manera similar se puede calcular una distancia en MW al colapso de voltaje con una expresión similar a la (2.13):

$$\Delta P_{ic} = \sum_{n=1}^{n_{max}^i} \Delta P_i^n \quad (2.21)$$

El procedimiento puede también modificarse para calcular una distancia en MVA al colapso de voltaje. Si se considera que la variación es al mismo tiempo en la carga activa y reactiva, es decir si se define, entonces bajo las mismas consideraciones anteriores, la distancia en MVA al colapso de voltaje queda definida por:

$$\Delta S_{ic} = \sqrt{(1 + \tan^2 \phi_i)} \sum_{n=1}^{n_{max}^i} \Delta P_i^n \quad (2.22)$$

El análisis de sensibilidades ha probado definir de manera acertada la condición de estabilidad de un sistema. Las cantidades ΔQ_{ic} , ΔP_{ic} y ΔS_{ic} , representan índices que pueden ser usados como una medida de la seguridad del sistema y ayudan a plantear desde la

perspectiva particular de cada uno de ellos, soporte de potencia reactiva, activa o magnitud de voltaje.

2.5 ANALISIS MODAL

En el análisis modal, las características de estabilidad de voltaje pueden estudiarse al introducir transformaciones lineales al modelo de orden reducido en (2.4). Asuma que $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{nc}$ son los valores propios de la matriz \mathbf{J}_R^Q . Por consiguiente, la matriz Jacobiana reducida puede expresarse en la forma [22,25]:

$$\mathbf{J}_R^Q = \xi \Lambda^{-1} \eta \quad (2.23)$$

donde $\xi = \text{col}[\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{nc}]$ y $\eta = \text{col}[\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{nc}]$ son las matrices de vectores propios izquierdo y derecho respectivamente, y Λ es la matriz diagonal de valores propios. Substituyendo (2.23) en (2.7), la respuesta Q-V del sistema puede entonces expresarse en la forma:

$$\Delta \mathbf{V} = \sum_{j=1}^{nc} \frac{\xi_j \eta_j}{\lambda_j} \Delta \mathbf{Q} \quad (2.24)$$

y

$$\frac{\Delta V_j}{\Delta Q_j} = \sum_{k=1}^{nc} \frac{\xi_{jk} \eta_{kj}}{\lambda_k} = \sum_{k=1}^{nc} \frac{P_{jk}}{\lambda_k} \quad (2.25)$$

Cada valor propio λ_j y sus correspondientes vectores propios izquierdo y derecho definen el j -ésimo *modo de voltaje* de la respuesta V-Q; el factor de participación $FP = \xi_{jk} \eta_{kj}$ proporciona la participación relativa del nodo k en el modo j de voltaje.

En coordenadas modales, la relación de sensibilidad entre las variaciones de voltaje y potencia reactiva se expresa en la forma [23]:

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & & \\ & & & \lambda_{n-ng} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \Delta q_n \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

en donde v_j, q_j representan las desviaciones de potencia activa y reactiva en coordenadas modales. Para el j -ésimo modo, la respuesta del sistema estará dada por la relación lineal $v_j = q_j / \lambda_j$. Si $\lambda_j > 0$ el sistema es estable; la magnitud del valor proporciona una medida relativa del grado de estabilidad.

Una vez determinados los valores propios, la participación de ramas, nodos y generadores en cada modo específico puede ser determinada.

Los enfoques actuales usados por la industria basados en esta técnica presentan las siguientes limitaciones:

- La simplificación $\Delta P=0$ no es siempre válida y puede conducir a resultados erróneos
- El análisis modal conduce a la identificación de varios modos críticos
- La aplicación práctica del método al estudio de redes de gran dimensión requiere la determinación de un conjunto reducido de valores propios en la vecindad del punto de inestabilidad. Los enfoques actuales de análisis pueden no determinar valores propios negativos, ocultando de esta forma zonas críticas
- La ubicación de medidas correctivas se realiza de manera heurística con base en criterios como factores de participación.

Las características de esta técnica de análisis pueden mejorarse cuando se utiliza de manera coordinada con las técnicas de sensibilidad [47] o con métodos de continuación.

2.5.1 Análisis de sensibilidades de eigenvalores

Una característica importante del enfoque de análisis modal es la posibilidad de analizar la sensibilidad de los modos de voltaje ante cambios en los parámetros del sistema. En analogía con un sistema dinámico, la sensibilidad de los valores propios de una matriz planta **A** al cambio en un parámetro α puede expresarse como:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \alpha} = \frac{\xi^T \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \alpha} \right) \eta}{\xi^T \eta} \quad (2.27)$$

La aplicación de la relación (2.27) al análisis de estabilidad de voltaje se dificulta debido a que en el proceso de análisis modal descrito, la matriz Jacobiana **J** se reduce a los nodos de carga. Una alternativa posible para resolver este problema consiste en utilizar una formulación aumentada en el proceso de cálculo de valores y vectores propios [32,47]. Este aspecto de interés se discute en el capítulo 4 de esta tesis.

2.6 METODOS DE CONTINUACION

Las principales ventajas de este tipo de formulaciones son la capacidad de determinar el punto de máxima cargabilidad del sistema. La referencia [35] discute la aplicación de esta técnica en conjunción con la técnica de análisis modal descrita en la sección anterior.

Los programas computacionales convencionales de flujos de potencia proporcionan información hasta justo antes de que se alcance el punto crítico de cargabilidad del sistema, ya que justo en el punto crítico el Jacobiano del sistema se torna singular lo que provoca problemas de convergencia en la solución de flujos. La técnica de continuación de flujos de potencia reformula las ecuaciones de balance de flujos de potencia de tal manera que las mantiene bien condicionadas para permitir solución en y después del punto crítico. De esta manera se obtiene convergencia tanto para puntos de equilibrio estables e inestables. Es decir, para las partes de alto y bajo voltaje de la curva P-V.

Esta aproximación se basa en los métodos seguidores de trayectoria (path-following methods) usados en la solución de ecuaciones algebraicas no lineales. En [49] se analiza un método de continuación localmente parametrizado para el análisis de flujos de potencia.

Las ecuaciones reformuladas para este análisis son similares a las del análisis convencional de flujos de potencia, excepto en que el incremento de la carga se añade como parámetro, y pueden ser expresadas como:

$$\mathbf{F}(\theta, \mathbf{V}, \lambda) = 0 \quad (2.28)$$

Donde:

- λ es el parámetro de la carga
- θ es el vector de ángulos de los voltajes nodales
- \mathbf{V} es el vector de magnitudes de los voltajes nodales

El conjunto de ecuaciones no lineales se resuelve para un valor de λ especificado. En donde $\lambda = 0$ representa la condición base de la carga y $\lambda = \lambda_{\text{crítica}}$ la carga crítica. Un proceso iterativo, el cual involucra una etapa predictor y otra correctora, es usado para resolver la ecuación (2.28), tal como se muestra en la figura 2.3. Dada una solución inicial \mathbf{A} , una tangente predictor se usa para estimar la solución \mathbf{B} para un patrón de incremento de carga determinado. La etapa correctora determina entonces la solución exacta \mathbf{C} usando un análisis convencional de flujos de potencia asumiendo fija la carga del sistema. Así se predicen los voltajes, para un mayor incremento en la carga, basado en una nueva tangente predictor. Si la nueva carga estimada \mathbf{D} se encuentra más allá de la carga máxima en la solución exacta, la etapa correctora con la carga fija no convergería; por lo tanto, se aplica un paso corrector con el voltaje fijo en el nodo monitoreado para encontrar la solución exacta \mathbf{E} . Mientras se aproxima al límite de estabilidad, el incremento en la carga debe ser reducido gradualmente durante los pasos predictores sucesivos para determinar la carga máxima.

En la etapa predictor se usa una aproximación lineal para estimar la próxima solución para el cambio en una de las variables de estado $(\theta, \mathbf{V}, \lambda)$.

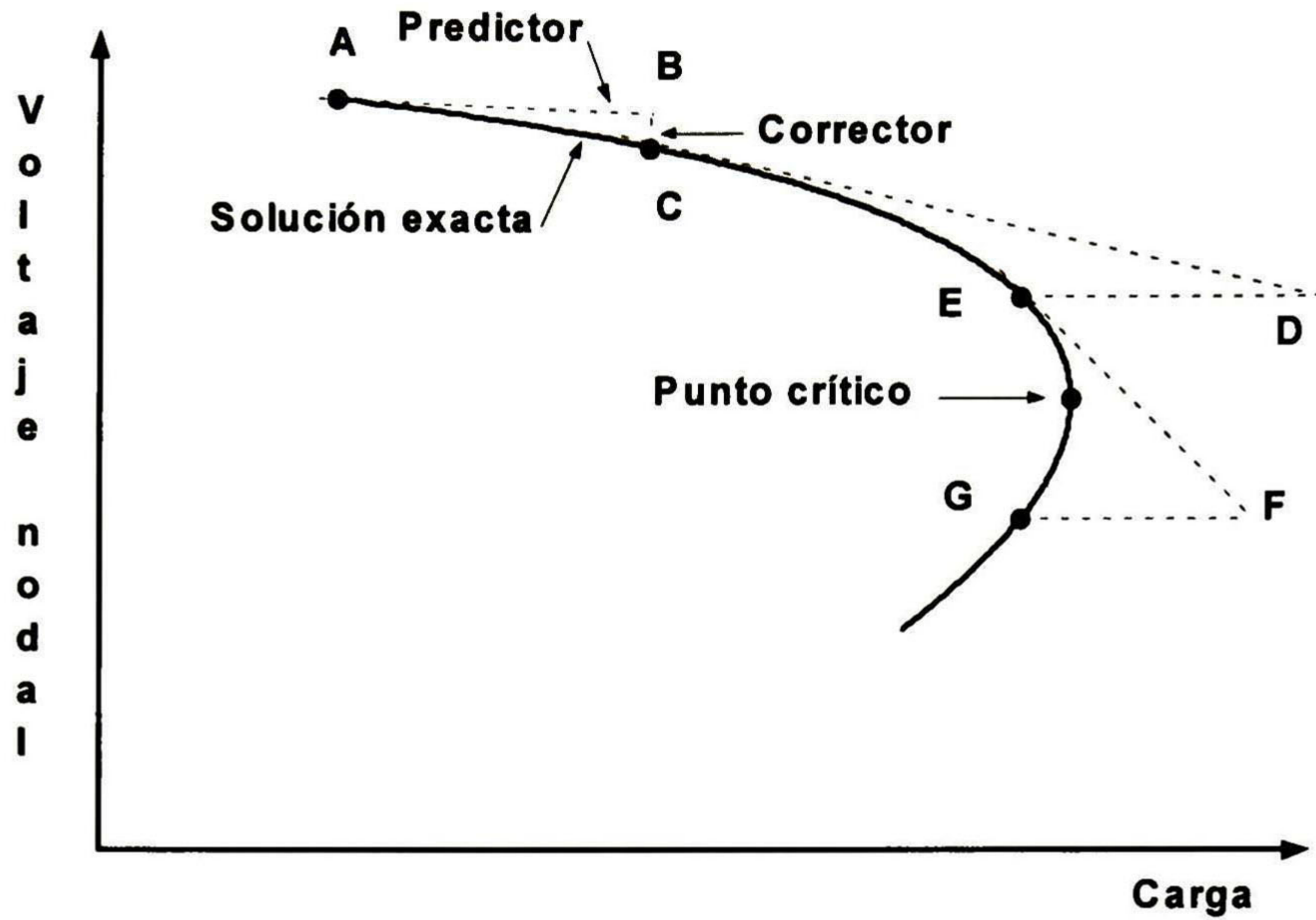


Figura 2.3

Secuencia de los cálculos en el método de continuación de flujos de potencia

Si se derivan ambos miembros de la ecuación (2.28), dado los valores iniciales de las variables de estado, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$F_{\theta}d\theta + F_v dV + F_{\lambda}d\lambda = 0 \quad (2.29)$$

Ya que al añadir el parámetro λ en las ecuaciones de flujo de potencia se aumentó una variable, se necesita una ecuación más para resolver (2.29). Esto se logra al hacer una de las componentes del vector tangente $+1$ ó -1 . Esta componentes es conocida como el parámetro de continuación [25]. Entonces la ecuación (2.29) se convierte en:

$$\begin{bmatrix} F_{\theta} & F_v & F_{\lambda} \\ & e_k & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Donde e_k es un vector renglón con todos sus elementos igual a cero excepto el k-ésimo (el correspondiente al parámetro de continuación) el cual es igual a 1.

Inicialmente el parámetro de la carga λ se escoge como el parámetro de continuación y el vector tangente se fija en $+1$. Durante las siguientes etapas predictoras, se escoge al estado con la mayor proporción de cambio en la cercanía de la solución dada como el parámetro de continuación, y el signo de su pendiente determina el signo asignado a la entrada correspondiente del vector tangente. Mientras más se aproxime a la máxima carga, típicamente será un voltaje el parámetro con el mayor cambio.

Una vez que el vector tangente ha sido encontrado, la predicción para la siguiente solución esta dada por:

$$\begin{bmatrix} \theta \\ \mathbf{V} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \mathbf{V}_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + s \begin{bmatrix} d\theta \\ d\mathbf{V} \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

En donde el subíndice “0” identifica los valores de las variables de estado al inicio de la etapa predictora. El tamaño del paso s se escoge de tal manera que exista solución al estudio de flujos dado el parámetro de continuación especificado.

Ya que en la etapa correctora el conjunto original de las ecuaciones $\mathbf{F}(\theta, \mathbf{V}, \lambda) = 0$ se aumenta en una ecuación que especifica la variable de estado como el parámetro de continuación, el nuevo conjunto es:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}(\theta, \mathbf{V}, \lambda) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = [0] \quad (2.32)$$

En la ecuación anterior, x_k es la variable de estado seleccionada como el parámetro de continuación y η es el valor predicho de x_k . Estas ecuaciones se resuelven mediante un método Newton Raphson ligeramente modificado, la inclusión de x_k permite que el Jacobiano no se vuelva singular en el punto de operación crítico. Ya que los elementos del vector tangente representan los cambios diferenciales en las variables de estado en respuesta al cambio diferencial en la carga del sistema, los elementos de $d\mathbf{V}$ pueden usarse para identificar nodos “débiles”, es decir aquellos que experimentan variaciones importantes en la magnitud de voltaje debido a los cambios en la carga [25].

En conclusión, el método de continuación de flujos de potencia es robusto y flexible. Está especialmente diseñado para resolver problemas de flujos de potencia con problemas de convergencia en un punto cercano a la solución. Sin embargo, este método es muy lento y consume demasiado tiempo.

ANALISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE MEDIANTE LA TECNICA DE DESCOMPOSICION EN VALOR SINGULAR

3.1 INTRODUCCION

La aplicación de técnicas de análisis lineal basadas en el análisis modal y la descomposición en valores singulares del modelo del SEP, presenta características de interés para el estudio de la estabilidad de voltaje en redes complejas. En los últimos años se ha generado un desarrollo acelerado de metodologías de uso práctico para el análisis y control de la estabilidad de voltaje. Entre ellos, los métodos de análisis modal y el método del valor singular mínimo se han convertido en las herramientas más confiables para la evaluación preliminar de la estabilidad de voltaje y la identificación del mecanismo fundamental de inestabilidad. Dos de los aspectos más importantes en el estudio y control de la estabilidad de voltaje que requieren mayor investigación en este tipo de metodologías son: la identificación de los elementos del sistema con mayor participación en el fenómeno de inestabilidad y el desarrollo de medidas de planeación de dispositivos de control.

En el presente capítulo se presenta una revisión de las características fundamentales de los métodos existentes para el estudio de estabilidad de voltaje basados en la descomposición en valores singulares de las ecuaciones de flujo de potencia. Se desarrolla un procedimiento sistemático para la identificación de zonas vulnerables del sistema a experimentar inestabilidad de voltaje y se proponen algoritmos para la identificación de los elementos y características del sistema con mayor influencia en el fenómeno. Finalmente se propone un modelo generalizado del SEP basado en el análisis de la respuesta incremental del sistema con características deseables para su utilización como herramienta de planeación de dispositivos de FACTS.

3.2 ANALISIS DE VALORES SINGULARES

Sea A una matriz compleja de orden n , existe una matriz unitaria $U = \text{col}[\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_n]$ de dimensión $n \times n$ y una matriz unitaria $n \times n$ $V = \text{col}[\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n]$ tal que [50]:

$$A = U \Sigma V^T = \sum_{i=1}^n \mathbf{u}_i \sigma_i \mathbf{v}_i^T \quad (3.1)$$

en donde $\Sigma = \text{diag}[\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n]$. La descomposición en (3.1) se conoce como la descomposición en valores singulares (DVS). Los escalares $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ son los valores

singulares de \mathbf{A} y los vectores $\mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i$ son los vectores singulares izquierdo y derecho definidos por las relaciones $\mathbf{A}\mathbf{v}_i = \sigma_i \mathbf{u}_i$ y $\mathbf{A}^T \mathbf{u}_i = \sigma_i \mathbf{v}_i$, respectivamente. El mínimo valor singular de la matriz \mathbf{A} proporciona una medida de la distancia entre \mathbf{A} y el conjunto de matrices deficientes en rango [51].

La DVS de la matriz \mathbf{A} está relacionada estrechamente a la eigen-estructura de las matrices $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ y $\mathbf{A} \mathbf{A}^T$. Se puede mostrar que:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{V} &= \mathbf{V} \Sigma^2 \\ \mathbf{A} \mathbf{A}^T \mathbf{U} &= \mathbf{U} \Sigma^2 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Por consiguiente, la inversa de una matriz no singular \mathbf{A} puede expresarse como

$$\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{V} \Sigma^{-1} \mathbf{U}^T = \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{v}_i \mathbf{u}_i^T}{\sigma_i} \quad (3.3)$$

en donde los valores singulares de la matriz \mathbf{A}^{-1} son los recíprocos de los valores singulares de \mathbf{A} .

La DVS de la matriz \mathbf{A} presenta las siguientes características adicionales de interés para el estudio de la estabilidad de voltaje:

- El mínimo valor singular (MVS) σ_{\min} de la matriz \mathbf{A} proporciona una medida de la cercanía a la singularidad, y en consecuencia, a la inestabilidad de voltaje.
- La adición de una columna a la matriz \mathbf{A} aumenta la magnitud del máximo valor singular y disminuye la magnitud del MVS [1]. En el estudio de la estabilidad de voltaje este fenómeno se presenta cuando un generador cambia su representación de nodo de voltaje controlado (PV) a nodo de carga (PQ) [29].
- La relación de los valores singulares máximo σ_{\max} y mínimo σ_{\min} proporciona una medida útil del condicionamiento débil de la matriz \mathbf{A} . El mal condicionamiento de la matriz Jacobiana puede asociarse al problema de colapso de voltaje en la cercanía del punto crítico[34]

Por otra parte, la sensibilidad de primer orden de un valor singular al cambio en un parámetro α puede expresarse como [52]:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \alpha} = \mathbf{u}_i^T \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \alpha} \right) \mathbf{v}_i \approx \boldsymbol{\xi}_i^T \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \alpha} \right) \boldsymbol{\eta}_i \quad (3.4)$$

donde α representa un parámetro arbitrario. Este criterio puede utilizarse para estimar el efecto de diferentes parámetros en los modos singulares. La utilización de este criterio como herramienta para el estudio de la estabilidad de voltaje se discute en el capítulo 4.

3.3 FORMULACION DEL PROBLEMA DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE MEDIANTE LA TECNICA DE DVS

En esta sección se presenta el desarrollo de una metodología eficiente para el análisis de estabilidad de voltaje basada en la utilización de la DVS de la matriz Jacobiana del problema de flujos de potencia. El procedimiento propuesto comprende dos pasos principales: La determinación aproximada del punto de máxima cargabilidad del sistema y la identificación de los principales factores que afectan a la estabilidad de voltaje.

3.3.1 Modelo básico del SEP

Usando las relaciones de ortogonalidad en (3.1) y resolviendo para la magnitud y fase del voltaje en terminales se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta\mathbf{V} \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{P} \\ \Delta\mathbf{Q} \end{bmatrix} = \left[\sum_{i=1}^m \frac{\mathbf{v}_i \mathbf{u}_i^T}{\sigma_i} \right] \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{P} \\ \Delta\mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

en donde $m=2n-ng-1$ y se asume que los valores singulares se ordenan en la forma $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_m$. Los vectores singulares izquierdo y derecho en (3.5) se definen como:

$$\mathbf{u}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_\theta \\ \mathbf{u}_v \end{bmatrix} = \left[u_{\theta^1} \quad \dots \quad u_{\theta^{n-1}} \quad u_{v^1} \quad \dots \quad u_{v^{nc}} \right]^T \quad (3.6)$$

$$\mathbf{v}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_\theta \\ \mathbf{v}_v \end{bmatrix} = \left[v_{\theta^1} \quad \dots \quad v_{\theta^{n-1}} \quad v_{v^1} \quad \dots \quad v_{v^{nc}} \right]^T \quad (3.7)$$

y se asume que los vectores singulares se normalizan en la forma:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_\theta^T \mathbf{u}_\theta + \mathbf{u}_v^T \mathbf{u}_v &= 1 \\ \mathbf{v}_\theta^T \mathbf{v}_\theta + \mathbf{v}_v^T \mathbf{v}_v &= 1 \end{aligned} \quad (3.8)$$

En estudios de estabilidad de voltaje, la matriz Jacobiana es real y prácticamente simétrica. Con estas consideraciones, puede mostrarse de las ecuaciones (3.2), que los valores singulares son iguales al valor absoluto de los valores propios en el análisis modal: asimismo, los vectores singulares izquierdo y derecho son iguales entre si e iguales a los vectores propios izquierdo y derecho.

En el punto de máxima cargabilidad del sistema la matriz \mathbf{J} es singular y en consecuencia, $\sigma_m \approx 0$. El comportamiento del sistema puede expresarse como [52]:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta\mathbf{V} \end{bmatrix} \approx \frac{\mathbf{v}_m \mathbf{u}_m^T}{\sigma_m} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{P} \\ \Delta\mathbf{Q} \end{bmatrix} = \mathbf{v}_m \mathbf{S}_m \quad (3.9)$$

en donde \mathbf{v}_m y \mathbf{u}_m son los vectores derecho e izquierdo asociados al MVS, y:

$$S_m = \frac{\mathbf{u}_m^T}{\sigma_m} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

El coeficiente S_m en (3.10) proporciona información sobre el efecto de cambios incrementales en la carga en la magnitud y fase de los voltajes nodales y puede utilizarse para determinar los valores singulares críticos. En la condición de máxima cargabilidad, un cambio pequeño en \mathbf{P} y \mathbf{Q} conduce a cambios grandes en \mathbf{V} y θ .

Para comprender el significado de los vectores singulares, considere que en el punto de colapso de voltaje, las potencias activa y reactiva de la carga se expresan en la forma

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \mathbf{u}_m^T \quad (3.11)$$

Substituyendo (3.11) en (3.10) y tomando en cuenta la normalización de los vectores singulares se muestra que

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{v}_m}{\sigma_m} \quad (3.12)$$

Del análisis de las ecuaciones (3.11) y (3.12) se deduce que [29,32]:

- Los coeficientes de mayor magnitud en el vector singular derecho indican las magnitudes de voltaje (ángulos) más sensitivos y en consecuencia los nodos críticos del sistema
- Los coeficientes de mayor magnitud en el vector singular izquierdo indican las direcciones más sensibles para cambios en las potencias activa y reactiva

La utilización de estos conceptos en el estudio de la estabilidad de voltaje se describe en las siguientes secciones.

3.3.2 Determinación de la condición de máxima cargabilidad

La identificación precisa del punto de colapso de voltaje solo es posible mediante programas especializados de potencia basados en métodos de continuación. En este trabajo, la condición de máxima cargabilidad se determina en forma aproximada utilizando un procedimiento heurístico de uso práctico.

El procedimiento básico utilizado para determinar la condición de máxima cargabilidad se adapta de [23] y comprende los siguientes pasos:

- a) A partir de un caso base de operación, la carga del sistema se aumenta de manera gradual en pasos fijos de magnitud arbitraria. Para cada nivel de demanda se realiza un estudio de flujo de potencia utilizando un simulador convencional. En este análisis, la carga se representa mediante una característica de potencia constante y se representan los límites de operación de generadores y otros elementos no lineales de control
- b) Para la última condición de operación para la que se obtiene convergencia, se calculan los valores singulares, se determinan las zonas vulnerables de sistema a presentar inestabilidad y en su caso se determinan medidas correctivas
- c) Para la condición de máxima cargabilidad se simulan contingencias de interés y se obtiene el margen de estabilidad siguiendo el procedimiento establecido en la sección 2.4.

3.3.3 Identificación de los valores singulares dominantes

El análisis de las ecuaciones de flujo de potencia en la cercanía del punto de singularidad en la sección anterior conduce a un modelo aproximado de la forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta\mathbf{V} \end{bmatrix} \approx \left[\sum_{i=1}^r \frac{\mathbf{v}_i \mathbf{u}_i^T}{\sigma_i} \right] \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{P} \\ \Delta\mathbf{Q} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^r \mathbf{v}_i S_i \quad (3.13)$$

donde r es el número de valores singulares dominantes que permiten estudiar en forma precisa el comportamiento del sistema y $S_i = \frac{\mathbf{u}_i}{\sigma_i} [\Delta\mathbf{P}, \Delta\mathbf{Q}]^T$. Los valores singulares $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$ son considerados dominantes si

$$\sum_{i=1}^r \mathbf{v}_i S_i \geq \sum_{j=r+1}^m \mathbf{v}_j S_j$$

La experiencia en este trabajo muestra que en general, $r \leq 3$ para permitir caracterizar de manera precisa las áreas críticas de un sistema complejo. El criterio heurístico utilizado consiste en despreciar componentes de S_i que contribuyan a una precisión menor al 95% en (3.13).

3.3.4 Identificación de áreas críticas y elementos con mayor participación en el (los) valor(es) singular(es) crítico(s)

Una vez que se han determinado los valores singulares dominantes es posible identificar los elementos del sistema que contribuyen en mayor grado al problema de estabilidad, Para cada valor singular de interés σ_i ($i=1, \dots, r$) en (3.13), los vectores singulares derechos \mathbf{v}_i indican los voltajes y ángulos más sensibles al cambio en la demanda de potencia activa y reactiva. La naturaleza dominante del fenómeno en estudio (ángulo o voltaje) se determina mediante el análisis de la magnitud del vector singular derecho; si el fenómeno está

asociado a la estabilidad de voltaje, entonces $\max(v_{\theta j}, j=1, \dots, ng-1) < \max(v_k, k=1, \dots, nc)$, donde nc es el número de nodos de carga.

Las áreas críticas se obtienen al unir los nodos que presenten mayor magnitud en el subvector singular crítico asociado a voltajes (v_v) en (3.8). Para un área k que comprende n_k nodos se define el Índice de Vulnerabilidad de Voltaje (IVV_k) en analogía con [6] como:

$$IVV_k = \sum_{i=1}^{n_k} \frac{v_{v^i}}{n_k} \quad (3.14)$$

El índice de voltaje representa el promedio ponderado de las desviaciones del vector singular derecho para un conjunto de n_k nodos. Por consiguiente, la zona más vulnerable asociada al valor singular crítico se define como:

$$IVV_{crit} = \max \{IVV_k\} \quad (3.15)$$

Habiendo determinado los voltajes y ángulos de fase con mayor influencia en el valor singular crítico, las participaciones de los generadores y fuentes de potencia reactiva se determinan de acuerdo al siguiente procedimiento propuesto en [43]:

Factor de participación de un generador o CEV (FP_g). El FP_g se determina como:

$$FP_g = \frac{Qg_i}{\sum_{j=1}^{ng} Qg_j} \quad (3.16)$$

donde Qg_i es la potencia reactiva asociada al modo de interés.

Factor de participación de rama (FP_R). El FP_R se calcula de la relación

$$FP_R = \frac{Qr_i}{\sum_{j=1}^{nr} Qr_j} \quad (3.17)$$

donde nr es el número de ramas del sistema y Qr_i son las pérdidas de potencia reactiva de la i -ésima rama calculada para el modo de interés

3.4 MODELADO DEL SISTEMA DE POTENCIA PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN ESTADO ESTABLE

En esta sección se propone un modelo del sistema de potencia con características deseables para el estudio de estabilidad de voltaje en estado estacionario, así como el desarrollo de medidas correctivas basadas en la aplicación de dispositivos de FACTS. El modelo

desarrollado tiene una estructura modular permitiendo la representación arbitraria de diferentes dispositivos de control.

3.4.1 Representación de las características de la carga

El modelo del sistema incluyendo las características de cargas dependientes de voltaje se expresa en la forma

$$\begin{aligned} \mathbf{P} + \mathbf{P}_L(\mathbf{V}) &= \mathbf{f}(\theta, \mathbf{V}) \\ \mathbf{Q} + \mathbf{Q}_L(\mathbf{V}) &= \mathbf{g}(\theta, \mathbf{V}) \end{aligned} \quad (3.18)$$

en donde los términos $\mathbf{P}_L(\mathbf{V})$ y $\mathbf{Q}_L(\mathbf{V})$ representan las componentes de la carga dependientes de voltaje, definidas como:

$$P_L = P_o \left(\frac{V_t}{V_t^o} \right)^{\alpha_p}, \quad Q_L = Q_o \left(\frac{V_t}{V_t^o} \right)^{\alpha_q} \quad (3.19)$$

donde α_p, α_q representan la sensibilidad de la carga a los cambios en la magnitud del voltaje; V_t^o es el voltaje nominal de operación.

Las ecuaciones linealizadas de flujo de potencia serán entonces

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{P\theta} & \mathbf{J}'_{PV} \\ \mathbf{J}_{Q\theta} & \mathbf{J}'_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

en donde:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}'_{PV} &= \mathbf{J}_{PV} - \left(\frac{\partial \mathbf{P}_L(\mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} \right) \\ \mathbf{J}'_{QV} &= \mathbf{J}_{QV} - \left(\frac{\partial \mathbf{Q}_L(\mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} \right) \end{aligned} \quad (3.21)$$

En esta representación, la condición de singularidad en la matriz Jacobiana estará determinada por las características de la matriz modificada \mathbf{J}' . Si la carga se representa como una fuente de potencia constante, la matriz modificada \mathbf{J}' coincide con la matriz Jacobiana convencional utilizada en la mayoría de los programas de flujos de potencia. Este análisis sugiere la utilización de un modelo similar para representar otros dispositivos de control, específicamente dispositivos de FACTS.

3.4.2 Representación de dispositivos de control

La inclusión de elementos de control, específicamente dispositivos de FACTS se realiza en este trabajo, mediante un modelo genérico de la forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_d^k \\ \Delta \mathbf{Q}_d^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_d^k \\ \Delta \mathbf{V}_d^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{PX}^k \\ \mathbf{J}_{QX}^k \end{bmatrix} \Delta \mathbf{X}_{FACTS}^k \quad (3.22)$$

donde:

- $\Delta \mathbf{P}_d^k, \Delta \mathbf{Q}_d^k$ = Cambio incremental en la potencia activa y reactiva del k -ésimo dispositivo
- $\Delta \theta_d^k, \Delta \mathbf{V}_d^k$ = Cambio incremental en la magnitud y fase del voltaje del k -ésimo dispositivo
- $\Delta \mathbf{X}_{FACTS}^k$ = Cambio incremental en la reactancia (susceptancia) del k -ésimo dispositivo

Las submatrices A_{11}, A_{12}, A_{21} y A_{22} representan relaciones apropiadas de sensibilidad, las cuales modifican la matriz Jacobiana en (3.21). Otras características de interés como la representación de límites de operación en generadores se obtiene mediante la modificación del modelo genérico en (3.22).

A continuación se describe brevemente la representación de estos elementos en el modelo del sistema desarrollado.

3.4.2.1 Compensación Estática de VARs

La figura 3.1 muestra la característica típica de operación en estado estable de un CEV. Para cada condición de operación, el punto de operación Q-V esta definido por la intersección de tres curvas [36]:

- La característica Q-V del dispositivo de control
- La característica Q-V de cada reactor o capacitor, y
- La característica Q-V del sistema

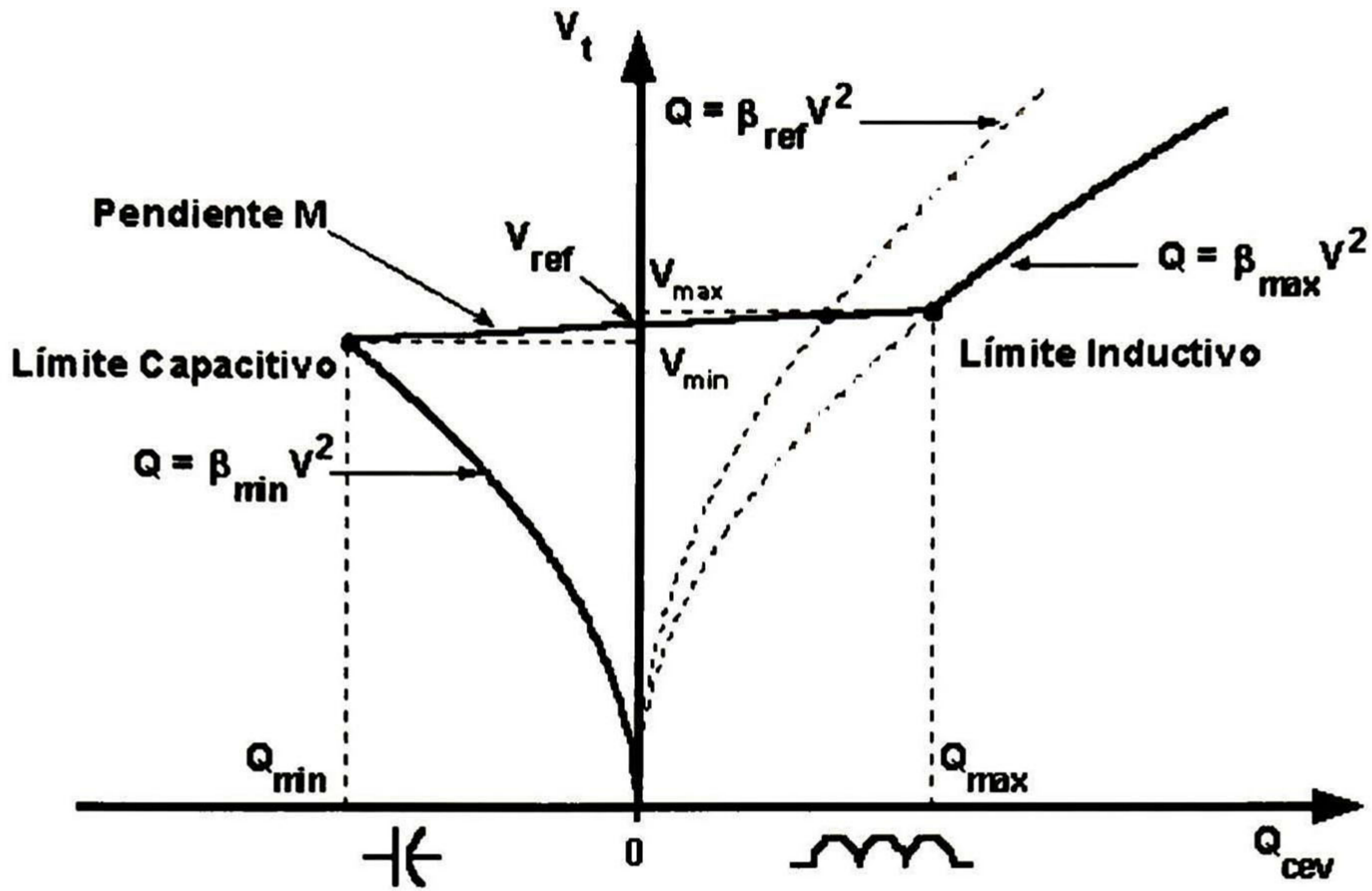


Figura 3.1.- Característica de operación en estado estable de un CEV

En la región lineal de control de voltaje, la potencia reactiva aportada por el CEV (Q_{cev}) puede aproximarse por la relación lineal [53]:

$$Q_{cev}^k = Q_d^k = V_t \left[\frac{V_t - V_{ref}}{M} \right] \quad (3.23)$$

donde V_t es la magnitud del voltaje en el nodo compensado, V_{ref} es el voltaje de referencia y M representa la característica $V-Q$ en el rango de control nominal, $Q_{min} < Q_{cev} < Q_{max}$. La inclusión de la ecuación (3.23) en las ecuaciones de flujo de potencia se obtiene al expandir el modelo no lineal alrededor de la condición de equilibrio.

Para investigar la ubicación de un CEV en estudios de estabilidad de voltaje, sin embargo, es conveniente utilizar una representación incremental de la forma [54]:

$$Q_{cev} = Q_d = \beta_{cev} V_t^2 \quad (3.24)$$

en donde la susceptancia del compensador β_{cev} se preserva de manera explícita como variable de entrada. Este enfoque permite la definición de modelos de lazo cerrado como se indica en el capítulo 4 de este documento. En el rango de control lineal $\beta_{cev} = (V_t - V_{ref})K$, en donde $K = (\beta_{max} - \beta_{min}) / (V_{max} - V_{min})$. Finalmente, la relación de interés se obtiene al expandir (3.24) alrededor de la condición de equilibrio caracterizada por β_{cev}^0, V_t^0

Si se desea mayor exactitud en el modelado, una alternativa eficiente de modelar la característica de control es utilizar una representación de la forma:

$$Q_{cev} = Q_d = V_d I_d = -K \left[V_t^3 - (V_{ref} + V_s) V_t^2 \right] \quad (3.25)$$

en donde V_s representa una señal suplementaria, asociada por ejemplo al control secundario de voltaje. La ecuación (3.25) permite representar al CEV como una carga no lineal dependiente del voltaje, en la cual se puede incluir el efecto de señales suplementarias de control de interés en otros estudios, específicamente el control secundario de voltaje.

3.4.2.2 Elementos de compensación serie (CSCT)

La figura 3.2 muestra el modelo simplificado de CSCT el cual representa una reactancia variable X_E conectada en serie con una reactancia X_L . Este modelo puede representar la reactancia variable de un CSCT conectado en serie con una línea de transmisión modelada por su equivalente en π o una reactancia X_L . Otras configuraciones como la inclusión de un CSCT en el punto medio de la línea de transmisión o en los extremos pueden deducirse de esta representación básica.

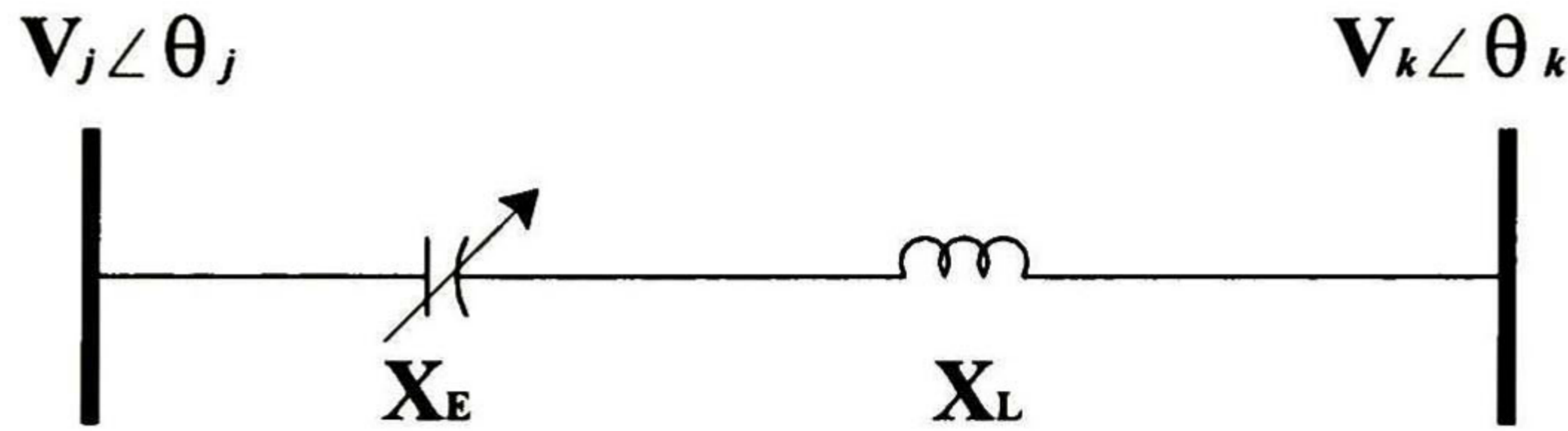


Figura 3.2.- Representación del CSCT conectado en la línea de transmisión

Las ecuaciones de potencia del circuito son:

Nodo j

$$P_j = \frac{V_j V_k \text{sen} \theta_{jk}}{X_E} \quad (3.26)$$

$$Q_j = -\frac{(V_j^2 - V_j V_k \cos \theta_{jk})}{X_E} \quad (3.27)$$

Nodo k

$$P_k = -\frac{V_j V_k \text{sen} \theta_{jk}}{X_E} \quad (3.28)$$

$$Q_k = -\frac{(V_k^2 - V_j V_k \cos \theta_{jk})}{X_E} \quad (3.29)$$

y el valor de la reactancia X_E dependerá del arreglo de CSCT considerado.

El efecto del CSCT en la red se puede simular por medio de inyecciones de potencia tal y como se muestra en la figura 3.3.

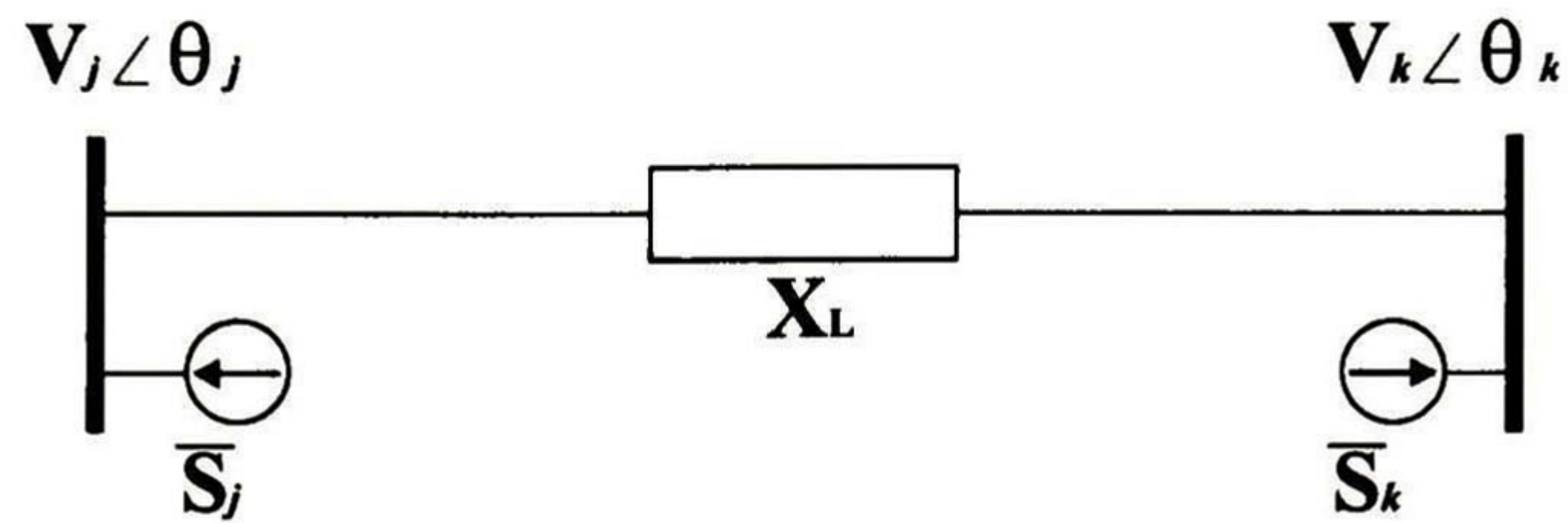


Figura 3.3.- Representación del CSCT mediante inyecciones de potencia.

en donde:

$$\begin{aligned} S_j &= P_j + jQ_j \\ S_k &= P_k + jQ_k \end{aligned}$$

Expandiendo las ecuaciones alrededor de la condición inicial de equilibrio se obtiene el modelo de interés:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_d^k \\ \Delta Q_d^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{PX}^k \\ J_{QX}^k \end{bmatrix} \Delta X_{TCSC} \quad (3.30)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_d^m \\ \Delta Q_d^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_m \\ \Delta V_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{PX}^m \\ J_{QX}^m \end{bmatrix} \Delta X_{TCSC} \quad (3.31)$$

donde J_{PX}^k, J_{QX}^k representan relaciones apropiadas de sensibilidad las cuales indican el efecto de un cambio en la reactancia X_{TCSC} en el CSCT en la potencia activa y reactiva del dispositivo. Este enfoque de análisis puede utilizarse para representar otros dispositivos de control como transformadores desplazadores de fase controlados por tiristores.

3.4.2.3 Controlador Unificado de Flujo de Potencia (CUFP)

La figura 3.4 muestra el diagrama esquemático de un CUFP, el cual está compuesto de un transformador de excitación (ET), un transformador elevador (BT), dos fuentes convertidoras de voltaje (VSC), y un enlace de corriente directa mediante un capacitor. La figura 3.5 muestra el diagrama equivalente del dispositivo [55].

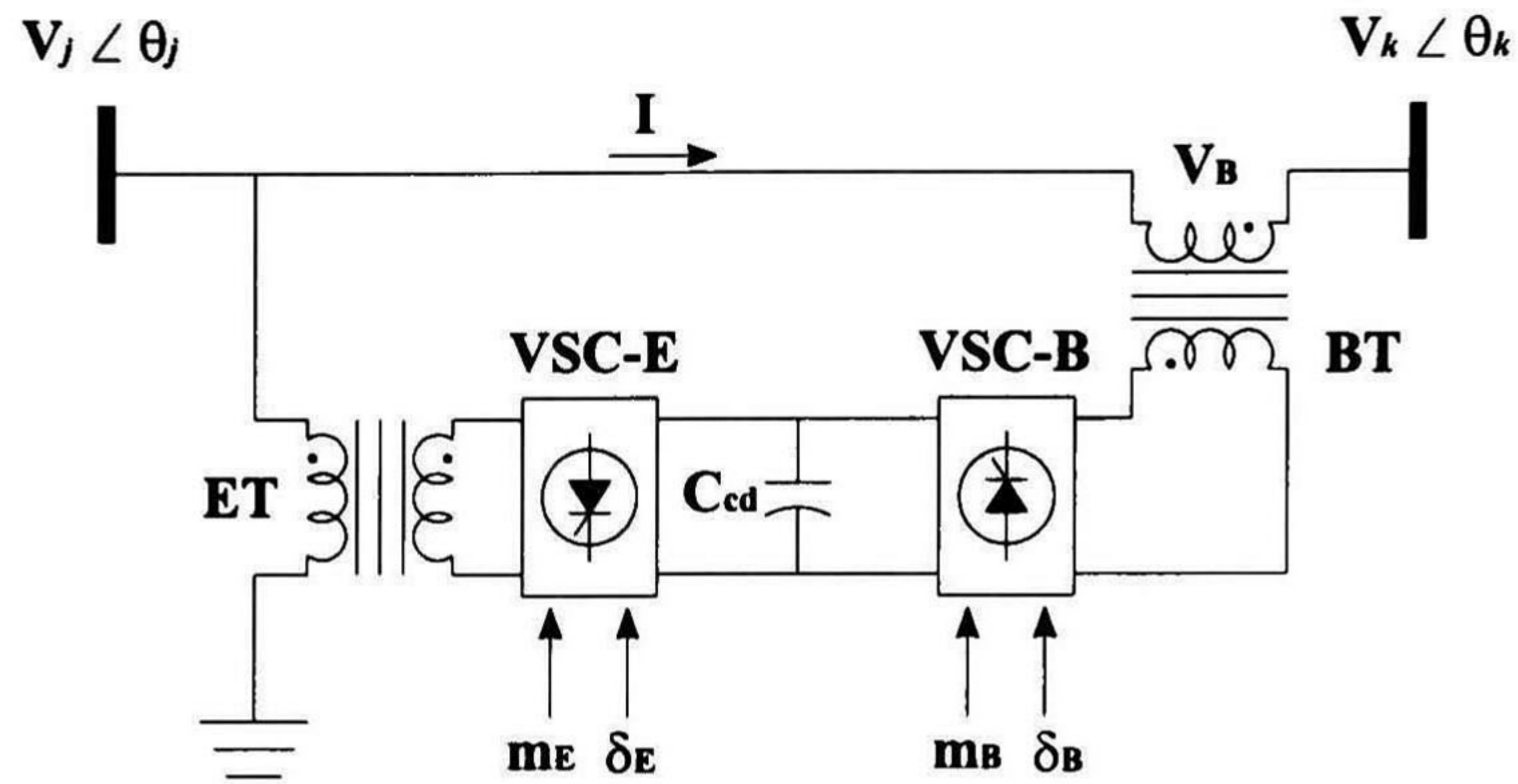


Figura 3.4.- Diagrama esquemático de un CUFP

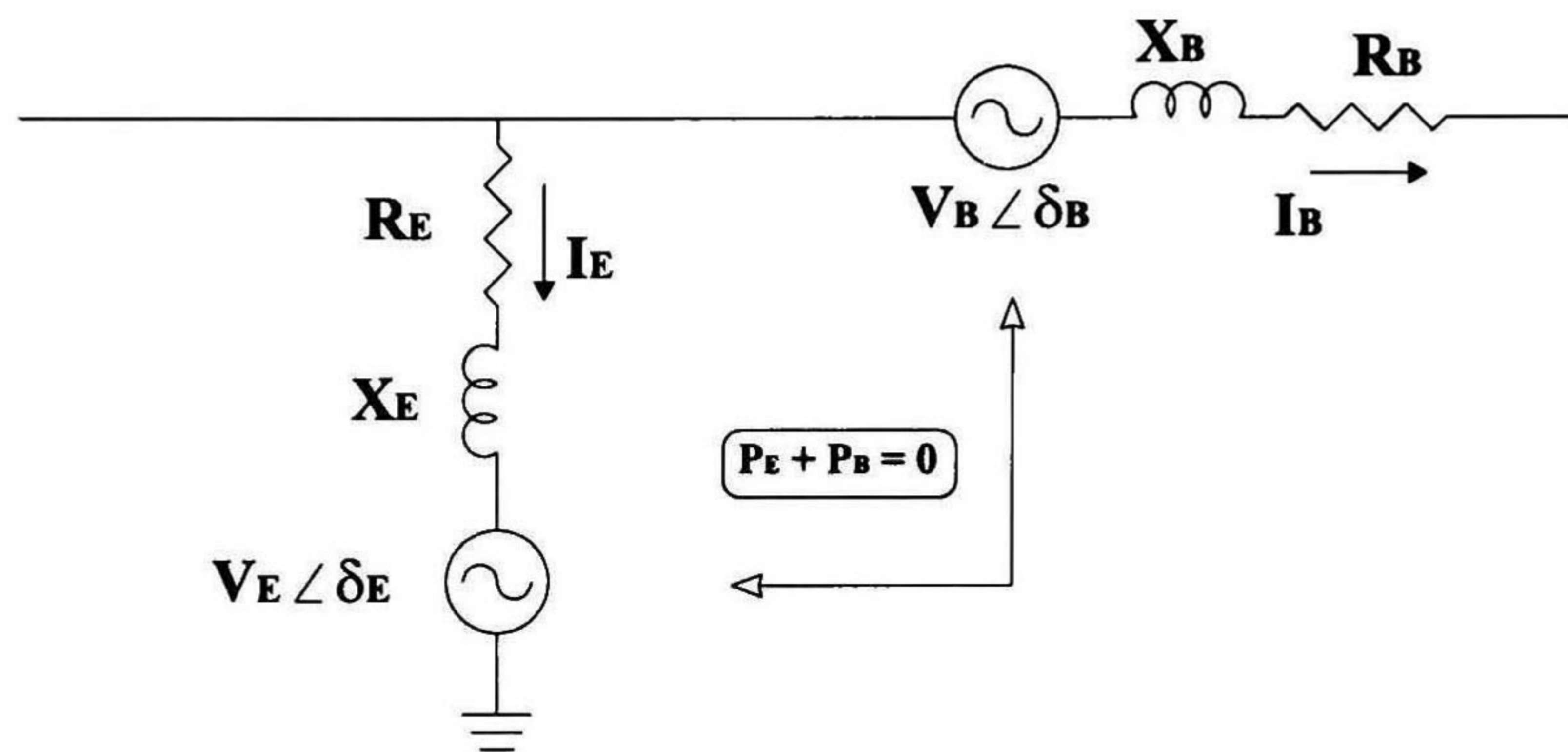


Figura 3.5.- Diagrama unifilar del modelo equivalente del CUFP en estado estable

La restricción de $P_B + P_E = 0$ implica que [55]:

- No existe intercambio de potencia activa entre el CUFP y el sistema, de esta manera el voltaje del enlace de C. D. permanece constante.
- Las fuentes convertidoras V_B y V_E son mutuamente dependientes ($P_B + P_E = 0$).

La figura 3.6b muestra el modelo del CUFP para el estudio de flujos de potencia, el cual se usa para:

- Mantener un valor previamente especificado del flujo de potencia del nodo E al B, y
- Regular el voltaje del nodo B, en un valor especificado.

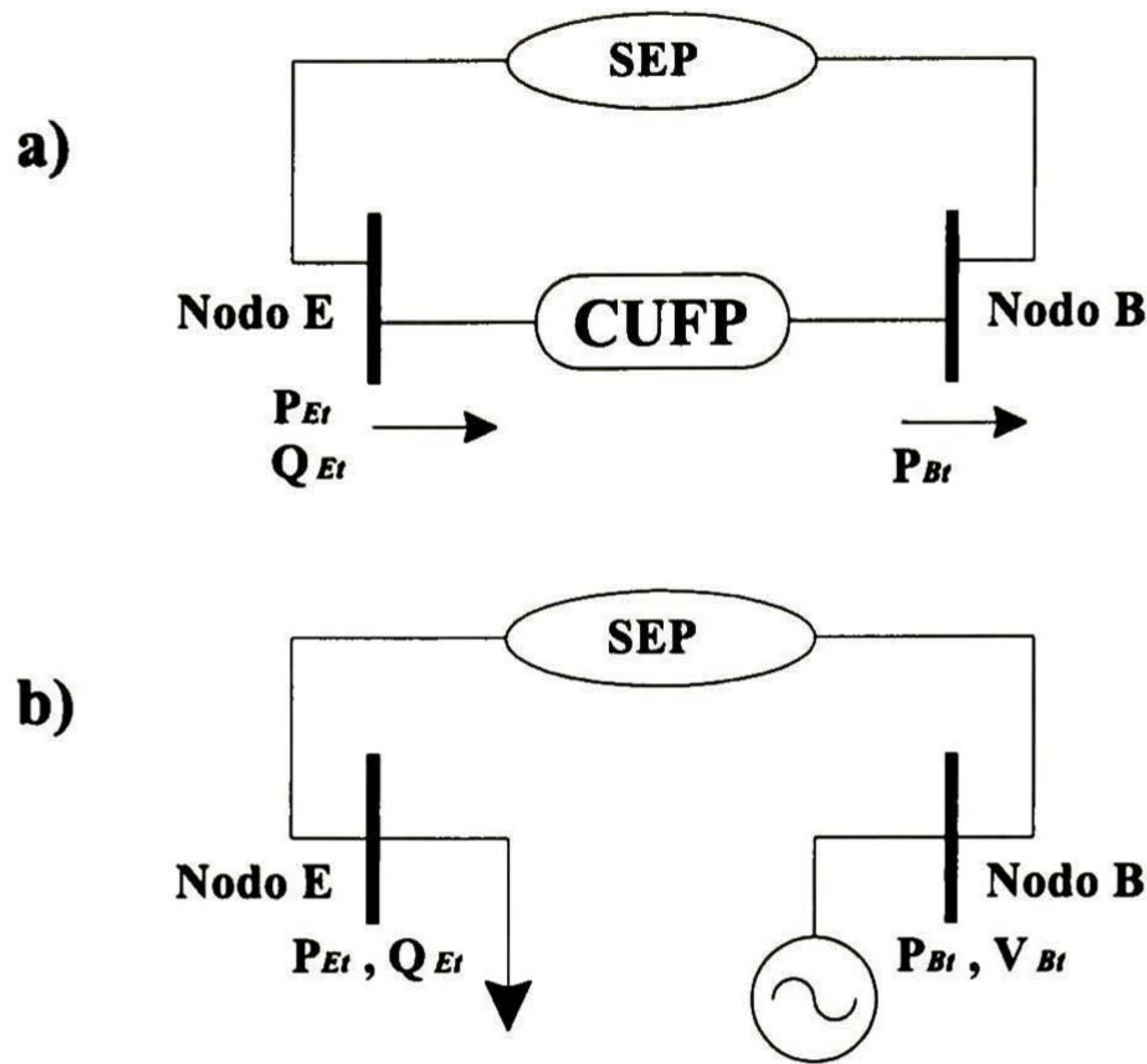


Figura 3.6.- a) Localización del CUFP en el SEP y b) Modelo del CUFP para el estudio de flujos de potencia

3.5 MODELO GLOBAL DEL SISTEMA DE POTENCIA

El modelo incremental del sistema de potencia para estudios de estabilidad de voltaje se expresa en forma compacta como:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{P\theta} & \mathbf{J}_{PV} \\ \mathbf{J}_{Q\theta} & \mathbf{J}_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}'_{P\theta} & \mathbf{J}'_{PV} \\ \mathbf{J}'_{Q\theta} & \mathbf{J}'_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{PX} \\ \mathbf{J}_{QX} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{X}_{FACTS} \quad (3.32)$$

en donde las matrices $\mathbf{J}'_{P\theta}$, \mathbf{J}'_{PV} , $\mathbf{J}'_{Q\theta}$, \mathbf{J}'_{QV} , \mathbf{J}_{PX} , \mathbf{J}_{QX} representan el efecto de los dispositivos de control y las características de dependencia de voltaje de la carga en la ecuación de balance de potencia; el vector $\Delta \mathbf{X}_{FACTS}$ representa las reactancias (susceptancias) de los dispositivos de FACTS representadas de manera explícita.

Resolviendo para el voltaje en terminales se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = (\mathbf{J}'')^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} + (\mathbf{J}'')^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{PX} \\ \mathbf{J}_{QX} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{X}_{FACTS} \quad (3.33)$$

En donde:

$$\mathbf{J}'' = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{P\theta} + \mathbf{J}'_{P\theta} & \mathbf{J}_{PV} + \mathbf{J}'_{PV} \\ \mathbf{J}_{Q\theta} + \mathbf{J}'_{Q\theta} & \mathbf{J}_{QV} + \mathbf{J}'_{QV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}''_{P\theta} & \mathbf{J}''_{PV} \\ \mathbf{J}''_{Q\theta} & \mathbf{J}''_{QV} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

La expresión (3.32) puede también expresarse en la forma reducida al considerar que $\Delta \mathbf{P}=0$, como:

$$\Delta \mathbf{V} = (\mathbf{J}''_R^Q)^{-1} \Delta \mathbf{Q} + (\mathbf{J}''_R^Q)^{-1} \mathbf{J}^X_R \Delta \mathbf{X}_{FACTS} \quad (3.35)$$

En donde

$$\begin{aligned} \mathbf{J}^Q_R &= \mathbf{J}''_{QV} - \mathbf{J}''_{Q\theta} (\mathbf{J}''_{P\theta})^{-1} \mathbf{J}''_{PV} \\ \mathbf{J}^X_R &= \mathbf{J}''_{QX} - \mathbf{J}''_{Q\theta} (\mathbf{J}''_{P\theta})^{-1} \mathbf{J}''_{PX} \end{aligned} \quad (3.36)$$

La utilización de este modelo para la ubicación de dispositivos de control se discute en el siguiente capítulo.

UBICACIÓN DE DISPOSITIVOS DE FACTS

4.1 INTRODUCCION

Los criterios actualmente utilizados por la industria eléctrica para la identificación de los principales factores que afectan a la estabilidad de voltaje así como el desarrollo de medidas de refuerzo del sistema se basan principalmente, en métodos heurísticos derivados de la utilización de las ecuaciones de flujos de potencia. En este contexto, criterios basados en la utilización de factores de participación, el análisis de sensibilidades V-Q y el cálculo de índices analíticos derivados de las ecuaciones de flujos de potencia se han incorporado a diversos programas comerciales. Estos procedimientos, sin embargo, demandan el análisis de una cantidad importante de alternativas de compensación conduciendo con frecuencia a criterios subóptimos de ubicación de dispositivos y un desarrollo ineficiente de acciones de control.

En este capítulo se proponen dos metodologías para la ubicación de dispositivos de control, así como la identificación de zonas vulnerables del sistema y el desarrollo de medidas correctivas basadas en la aplicación de dispositivos de FACTS. El primer enfoque está basado en el análisis de la sensibilidad de los valores singulares al cambio en parámetros del sistema. Este criterio se utiliza para determinar elementos del sistema, en donde la acción de control de voltaje influye de manera significativa en el margen de estabilidad de voltaje. Este enfoque puede utilizarse en la etapa inicial de estudios de estabilidad de voltaje y como punto de inicio en la implementación de esquemas de control secundario de voltaje.

El segundo enfoque de estudio se basa en la definición de un modelo del SEP de lazo cerrado obtenido de un modelo ficticio equivalente dinámico. A partir de esta representación se obtienen criterios para la ubicación de dispositivos de control con base en el análisis de los residuos de las funciones de transferencia y el análisis de controlabilidad de los modos críticos de estabilidad de voltaje. Este criterio puede también utilizarse para evaluar el impacto de dispositivos existentes de control en el sistema.

4.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE VALORES SINGULARES

Asuma que el comportamiento en estado estable del sistema se describe por el modelo descrito en la sección 3.3. La sensibilidad de primer orden de un valor singular σ_i al cambio incremental en un parámetro arbitrario, α puede obtenerse como [52]:

$$\frac{\partial \sigma_i}{\partial \alpha} = \mathbf{u}_i^T \left(\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \alpha} \right) \mathbf{v}_i \approx \xi_i^T \left(\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \alpha} \right) \boldsymbol{\eta}_i \quad (4.1)$$

donde α es un parámetro que puede representar diferentes cantidades físicas.

Diferenciando con respecto al parámetro α se obtiene la relación de sensibilidad de primer orden:

$$\frac{\partial \sigma_j}{\partial \alpha} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{\theta^j} & \mathbf{v}_{v^j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial \theta \partial \alpha} & \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial \mathbf{V} \partial \alpha} \\ \frac{\partial^2 \mathbf{Q}}{\partial \theta \partial \alpha} & \frac{\partial^2 \mathbf{Q}}{\partial \theta \partial \alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{\theta^j} \\ \mathbf{u}_{v^j} \end{bmatrix} =$$

$$\mathbf{v}_{\theta^j} \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial \theta \partial \alpha} \mathbf{u}_{\theta^j} + \mathbf{v}_{\theta^j} \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial \mathbf{V} \partial \alpha} \mathbf{u}_{v^j} + \mathbf{v}_{v^j} \frac{\partial^2 \mathbf{Q}}{\partial \theta \partial \alpha} \mathbf{u}_{\theta^j} + \mathbf{v}_{v^j} \frac{\partial^2 \mathbf{Q}}{\partial \theta \partial \alpha} \mathbf{u}_{v^j}$$
(4.2)

para $j = 1, \dots, r$

en donde \mathbf{u}_{θ^j} , \mathbf{u}_{v^j} , \mathbf{v}_{θ^j} y \mathbf{v}_{v^j} son los subvectores de ángulo y voltaje asociados al j -ésimo valor singular. Por lo tanto, el cambio en el valor singular causado por el cambio en el parámetro α puede estimarse mediante la relación lineal

$$\Delta \sigma_j = \frac{\partial \sigma_j}{\partial \alpha} \Delta \alpha, \quad j = 1, \dots, r$$
(4.3)

Se deduce de la ecuación (4.3) que los elementos de la red con mayor magnitud en la sensibilidad representan elementos débiles en donde la acción de control o cambio en las condiciones de operación produce el mayor cambio en los valores singulares críticos. Así por ejemplo, un valor significativo en la sensibilidad de un valor singular al cambio en el voltaje de un nodo indica una ubicación deseable para un dispositivo de control en paralelo.

El cálculo de sensibilidades en la ecuación (4.2) involucra la suma de matrices con un alto grado de dispersidad por lo que su evaluación es muy eficiente para redes de gran tamaño. En el modelo propuesto, el parámetro α representa variables analíticas en la representación de flujos de potencia, específicamente: a) La reactancia serie de una línea de transmisión, b) La magnitud del voltaje en nodos de carga, c) Las características de la carga, y d) Otros parámetros considerados explícitamente en las ecuaciones de flujo de potencia tales como cambiadores de taps, voltajes de referencia en CEVs y otros elementos de control, etc.

Una vez que se han determinado los modos dominantes mediante el análisis convencional de vectores singulares, la ecuación (4.2) se utiliza para identificar los nodos y elementos con mayor influencia en el margen de estabilidad del modo crítico de acuerdo al siguiente criterio:

1. La experiencia con el análisis de estabilidad de voltaje en algunos sistemas muestra que la estabilidad global de voltaje del sistema puede mejorarse al controlar el voltaje en nodos con una influencia importante en el voltaje [56],[57]. El proceso de identificación comprende los siguientes pasos:
 - (a) *Identificación de nodos piloto*: Estos son los nodos con mayor magnitud en la relación (4.2) e indican nodos donde la ubicación de dispositivos de control tiene el mayor

efecto en los márgenes de estabilidad de voltaje. En el caso de dispositivos de control existentes, el análisis de sensibilidad indica la posibilidad de utilizar estrategias de control secundario a nivel del área crítica para propósitos de estabilización global.

- (b) *Identificación de ramas críticas*: Las ramas con una participación significativa, indican en principio, ubicaciones potenciales de dispositivos de control serie. Por otra parte, las ramas críticas proporcionan un criterio para la selección de contingencias en la evaluación de márgenes de estabilidad.
- (c) *Determinación de áreas de voltaje*: Las áreas de voltaje presentan dos características fundamentales: 1) Tienen poco soporte de potencia reactiva, 2) su interconexión con otras parte del sistema es débil. Cada área contiene un nodo piloto determinado en el paso a).
- (d) Se desarrollan *medidas de refuerzo* o de control del sistema basadas en el criterio de sensibilidades. La extensión de esta análisis al estudio de otros elementos puede utilizarse para lograr acciones específicas de control, tales como el bloqueo de taps en transformadores, etc.

En la Tabla 4.1 se resumen las principales relaciones de sensibilidad desarrolladas, indicando su objetivo principal en el análisis del fenómeno de estabilidad de voltaje. En el contexto de este trabajo, el análisis de sensibilidades se utiliza como una herramienta de identificación rápida de los elementos críticos del sistema así como el análisis de condiciones de operación que pueden conducir a la inestabilidad.

Tabla 4.1
Aplicación del análisis de sensibilidad al análisis y desarrollo de medidas correctivas

| Sensibilidad | Propósito |
|--|---|
| $\frac{\partial \sigma_k}{\Delta \beta_{shj}}$ | Ubicación de bancos de reactores en paralelo |
| $\frac{\partial \sigma_k}{\Delta X_{ij}}$ | Ubicación de capacitores serie |
| $\frac{\partial \sigma_k}{\partial V_j}$ | Determinación de nodos dominantes (nodos piloto) para control de voltaje |
| $\frac{\partial \sigma_k}{\Delta \partial V_{ref j}}$ | Análisis del efecto de control de voltaje en el k-ésimo CEV |
| $\frac{\partial \sigma_k}{\Delta \partial \alpha_{pj}}, \frac{\partial \sigma_k}{\Delta \partial \alpha_{qj}}$ | Identificación del efecto de las características de la carga en la estabilidad de voltaje |
| $\frac{\Delta \sigma_k}{\Delta \partial_{tap^j}}$ | Determinación de líneas para ubicar transformadores Estáticos Cambiadores de Taps. |

Estas relaciones pueden implementarse de manera eficiente en cualquier programa de flujos de potencia, proporcionando información general sobre las áreas vulnerables del sistema así como el desarrollo de medidas correctivas o de refuerzo del sistema.

4.3 FORMULACION DEL PROBLEMA DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN TERMINOS DE VARIABLES DE ESTADO

Las características de estabilidad de voltaje del sistema pueden estudiarse con mayor profundidad al considerar que los valores propios de la matriz $(\mathbf{J}_Q^R)^{-1}$ son equivalentes a los valores propios del polinomio característico [22]:

$$s\mathbf{I} + (\mathbf{J}_R^Q)^{-1} = 0 \quad (4.4)$$

Esta interpretación permite obtener una correlación práctica entre un modelo estacionario con un modelo dinámico ficticio equivalente.

Con estas consideraciones, y haciendo una analogía con un modelo en espacio de estados, el problema de estabilidad de voltaje en estado estable puede estudiarse con base en el modelo ficticio equivalente:

$$\Delta \dot{\mathbf{V}} = -(\mathbf{J}_R^Q)^{-1} \Delta \mathbf{V} + \Delta \mathbf{Q}_{ord} \quad (4.5)$$

en donde:

$\Delta \mathbf{V}$ = Vector de estado de cambios incrementales en las magnitudes de voltaje nodal

$\Delta \mathbf{Q}_{ord}$ = Vector de cambios incrementales en la carga del sistema, para la cual se considera una característica de potencia constante

En la figura 4.1 se muestra la función de transferencia del sistema equivalente de estado para el análisis de estabilidad de voltaje. En este modelo, el vector $\Delta \mathbf{Q}_d$ representa el cambio resultante en la demanda de potencia reactiva de la carga, y otros elementos causado por el cambio en la variación de la magnitud de voltaje, esto es:

$$\Delta \mathbf{Q}_d(s) = (\mathbf{J}_R^Q)^{-1} \Delta \mathbf{V}(s) = \left[\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{V}} \right] \Delta \mathbf{V}(s) \quad (4.6)$$

El valor propio crítico de la matriz $(\mathbf{J}_Q^R)^{-1}$ toma un valor infinito en el límite de estabilidad cuando $\det(\mathbf{J}_Q^R) = 0$. Por otra parte, los valores propios coinciden con los polos de la función de transferencia $G_j(s) = \Delta V_j(s) / \Delta Q_{ordj}(s)$.

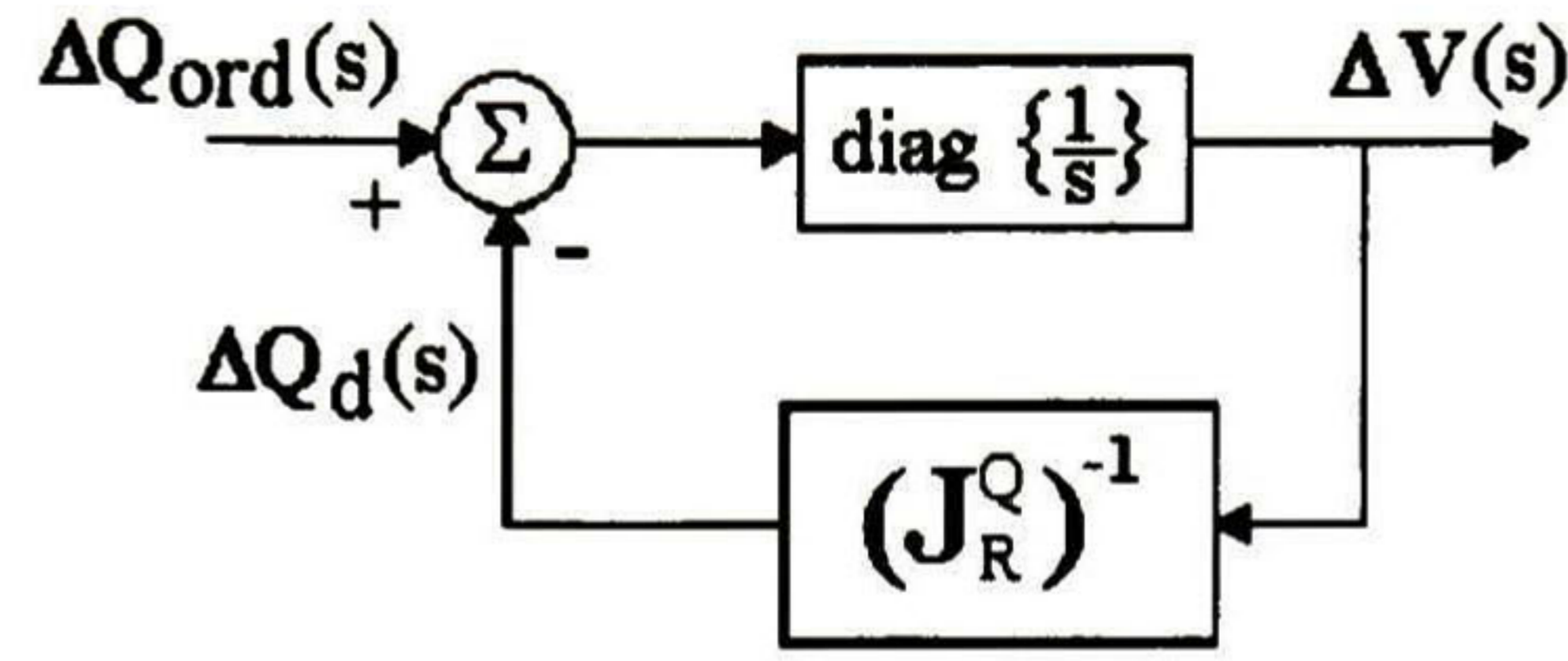


Fig. 4.1- Modelo equivalente del SEP para estudios de estabilidad de voltaje

La utilización de este modelo para determinar la ubicación de dispositivos de FACTS y otras acciones de control se discute en las siguientes secciones.

4.4 UBICACIÓN DE DISPOSITIVOS DE FACTS

En esta sección se proponen dos métodos alternos para la ubicación de dispositivos de FACTS con base en la metodología propuesta. El procedimiento es general y puede extenderse para considerar otros elementos.

4.4.1 Transformación a un sistema equivalente

Considere que el comportamiento del sistema se describe por el siguiente modelo incremental

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{P\theta} & \mathbf{J}_{PV} \\ \mathbf{J}_{Q\theta} & \mathbf{J}_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}'_{P\theta} & \mathbf{J}'_{PV} \\ \mathbf{J}'_{Q\theta} & \mathbf{J}'_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{PX} \\ \mathbf{J}_{QX} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{X}_{FACTS} \quad (4.7)$$

en donde las submatrices \mathbf{J}' aparecen de la representación de las características de la carga con dependencia de voltaje y el modelado de dispositivos existentes de FACTS. El vector $[\mathbf{J}_{PX}, \mathbf{J}_{QX}]^T$ representa la inclusión de nuevos dispositivos.

El modelo dinámico equivalente del SEP para estudios de estabilidad de voltaje puede expresarse como:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\theta} \\ \Delta \dot{V} \end{bmatrix} = (\mathbf{J}'')^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{PX} \\ \mathbf{J}_{QX} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{X}_{FACTS} \quad (4.8)$$

en donde:

$$\mathbf{J}'' = \begin{bmatrix} \mathbf{J}''_{P\theta} & \mathbf{J}''_{PV} \\ \mathbf{J}''_{Q\theta} & \mathbf{J}''_{QV} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

y

$$\begin{aligned}
\mathbf{J}''_{P\theta} &= \mathbf{J}_{P\theta} + \mathbf{J}'_{P\theta} \\
\mathbf{J}''_{PV} &= \mathbf{J}_{PV} + \mathbf{J}'_{PV} \\
\mathbf{J}''_{Q\theta} &= \mathbf{J}_{Q\theta} + \mathbf{J}'_{Q\theta} \\
\mathbf{J}''_{QV} &= \mathbf{J}_{QV} + \mathbf{J}'_{QV}
\end{aligned}
\tag{4.10}$$

El vector $\Delta\mathbf{P}$ representa la componente de carga considerada constante. Si bien, el modelo dinámico ficticio en (4.8) puede utilizarse para el análisis del comportamiento del sistema, es difícil encontrar una interpretación física a la variación del ángulo de fase.

4.4.2 Modelo de orden reducido

Asumiendo que $\Delta\mathbf{P}=0$ en (4.7), y resolviendo para las magnitudes de voltajes en nodos de carga se obtiene la relación de sensibilidad de orden reducido:

$$\Delta\mathbf{V} = (\mathbf{J}''_R^Q)^{-1} \Delta\mathbf{Q} + (\mathbf{J}''_R^Q)^{-1} \mathbf{J}_R^X \Delta\mathbf{X}_{FACTS}
\tag{4.11}$$

en donde:

$$\begin{aligned}
\mathbf{J}_R^Q &= \mathbf{J}''_{QV} - \mathbf{J}''_{Q\theta} (\mathbf{J}''_{P\theta})^{-1} \mathbf{J}''_{PV} \\
\mathbf{J}_R^X &= \mathbf{J}''_{QX} - \mathbf{J}''_{Q\theta} (\mathbf{J}''_{P\theta})^{-1} \mathbf{J}''_{PX}
\end{aligned}
\tag{4.12}$$

y la matriz $(\mathbf{J}''_R^Q)^{-1} \mathbf{J}_R^X$ representa la sensibilidad de las magnitudes de voltaje a la acción de control de los dispositivos FACTS.

Para propósitos de análisis, la ecuación (4.11) puede representarse mediante el sistema equivalente de estado

$$\Delta\dot{\mathbf{V}} = (\mathbf{J}''_R^Q)^{-1} \mathbf{J}_{QV} \Delta\mathbf{V} + \Delta\mathbf{Q} + \mathbf{J}_R^X \Delta\mathbf{X}_{FACTS}
\tag{4.13}$$

$$\mathbf{y}(s) = \mathbf{C} \Delta\mathbf{V}(s)$$

donde $\mathbf{y}(s)$ es el vector de salida el cual representa las magnitudes de voltaje de interés y la matriz \mathbf{C} es una relación apropiada. En la figura 4.2 se muestra el diagrama equivalente de estado utilizado en este trabajo para el estudio de la estabilidad de voltaje.

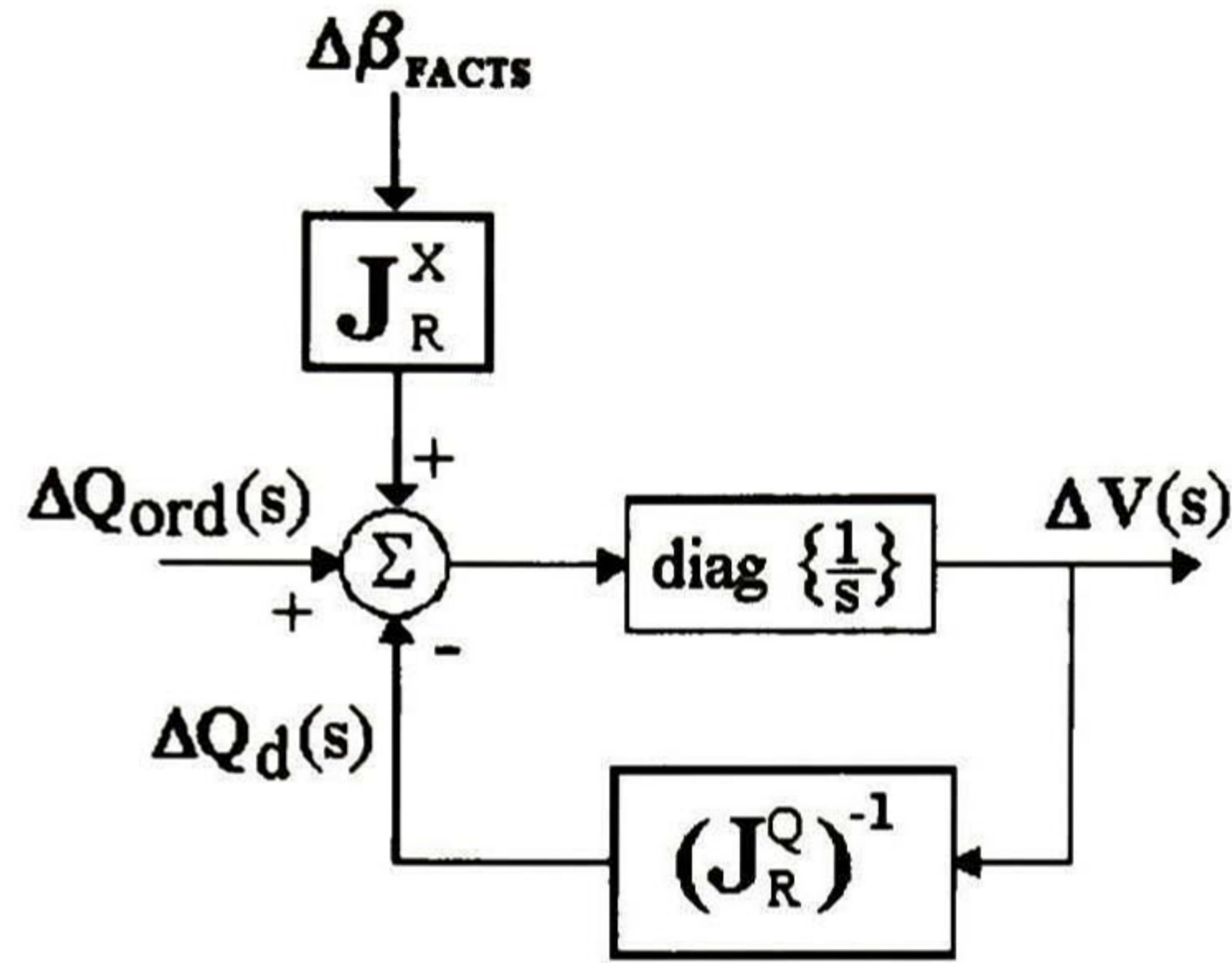


Figura 4.2.- Diagrama de bloques del modelo del SEP de orden reducido incluyendo la representación de dispositivos de FACTS

4.4.3 Análisis de residuos

Las funciones de transferencia que relacionan el cambio en la carga y el cambio en la acción de control al cambio resultante en las magnitudes de voltajes nodales están dadas por las relaciones (4.14) y (4.15):

- (a) Función de transferencia entre el cambio en la demanda y el cambio en la magnitud de los voltajes terminales

$$\mathbf{y}(s) = \mathbf{G}_L(s) \Delta \mathbf{Q}_{ord}(s) = \mathbf{C} \left[s\mathbf{I} - (\mathbf{J}_R^Q)^{-1} \right]^{-1} \Delta \mathbf{Q}_{ord} \quad (4.14)$$

- (b) Función de transferencia entre el cambio en la susceptancia (reactancia) de los dispositivos de control y el cambio en el voltaje en terminales

$$\mathbf{y}(s) = \mathbf{C} \mathbf{G}_{facts}(s) \Delta \mathbf{X}_{FACTS}(s) = \mathbf{C} \left[s\mathbf{I} - (\mathbf{J}_R^Q)^{-1} \right]^{-1} \mathbf{J}_R^X \Delta \mathbf{X}_{FACTS} \quad (4.15)$$

donde $\mathbf{G}_L(s)$ y $\mathbf{G}_{facts}(s)$ representan las funciones de transferencia de interés.

Sean λ_i ($i=1, \dots, nc$) los valores propios asociados a la matriz $(\mathbf{J}_R^Q)^{-1}$ y ξ_i y η_i los vectores propios izquierdo y derechos correspondientes a λ_i , las funciones de transferencia en (4.14) y (4.15) pueden expresarse en forma genérica como [47,58]:

$$\mathbf{y}(s) = \mathbf{G}(s) \mathbf{u}(s) = \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{(s - \lambda_i)} \mathbf{R}_i \right] \quad (4.16)$$

en donde $\mathbf{u}(s)$ representa el vector de variables de entrada; las matrices de residuos asociadas de las funciones de transferencia $\mathbf{G}_L(s)$ y $\mathbf{G}_{facts}(s)$ son:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_i(\mathbf{G}_L) &= \mathbf{C} \mathbf{p}_i \mathbf{q}_i^T \\ \mathbf{R}_i(\mathbf{G}_{facts}) &= \mathbf{C} \mathbf{p}_i \mathbf{q}_i^T \mathbf{J}_R^X \end{aligned} \quad (4.17)$$

El análisis de residuos proporciona una medida de los nodos más sensibles al cambio en el nivel de carga y la acción de control, indicando nodos en donde la ubicación de dispositivos de control puede mejorar la estabilidad de voltaje [47,58]. Se puede observar que los residuos asociados al efecto de cargas representadas como una impedancia constante corresponden a los factores de participación.

Para evaluar, el efecto de los dispositivos de control, los residuos se ordenan en orden de magnitud descendente $R_1 > R_2 > \dots > R_n$ indicando la mejor ubicación del dispositivo.

En la Tabla 4.2 se sintetiza la utilización, en este trabajo, del análisis de residuos para el diseño de medidas correctivas y la ubicación de dispositivos de FACTS.

Tabla 4.2
Aplicación del análisis de residuos al problema de ubicación de dispositivos de FACTS

| Función de Transferencia | Propósito |
|---|---|
| $\frac{\Delta V(s)}{\Delta \beta_{cev}(s)}$ | Ubicación de CEVs |
| $\frac{\Delta V(s)}{\Delta Q_d(s)}$ | Ubicación de compensadores estáticos avanzados de VARs |
| $\frac{\Delta V(s)}{\Delta X_{TCSC}(s)}$ | Ubicación de capacitores serie controlados por tiristores |
| $\frac{\Delta V(s)}{\Delta_{tap}(s)}$ | Determinación de líneas de transmisión para ubicar transformadores Estáticos Cambiadores de Taps. |

4.4.4 Análisis de controlabilidad de los modos críticos

El problema de ubicación de los controles puede asociarse al análisis de controlabilidad de un modo de interés con respecto a una entrada de control o ubicación de un dispositivo. Considérese un sistema dinámico lineal de la forma

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (4.18)$$

El sistema en (4.18) es controlable, si [51,58]:

$$\text{rango} (\mathbf{B}, \mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I}) = n, \quad i = 1, \dots, n \quad (4.19)$$

Además, puede mostrarse que la distancia entre el sistema (\mathbf{A}, \mathbf{B}) en (4.18) y el conjunto de sistemas incontrolables es el mínimo de los valores singulares de la matriz aumentada $[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}, \mathbf{B}]$ con respecto a n .

Para determinar la mejor ubicación de un dispositivo en un nodo o línea de transmisión en el modelo en (4.13), la entrada de control (ubicación de dispositivo) corresponde a la j -ésima columna de la matriz \mathbf{J}_R^X . Por consiguiente, el sistema en (4.13) será controlable por la acción de control del j -ésimo dispositivo de FACTS si la matriz:

$$\mathbf{W}_j^i = \left[\lambda_i \mathbf{I} - (\mathbf{J}_Q^R)^{-1}, (\mathbf{J}_R^X)_j \right] \quad (4.20)$$

es de rango pleno. El MVS de (4.20) proporciona una medida práctica del grado de controlabilidad y, en consecuencia de la efectividad de la acción de control.

La aplicación del análisis de controlabilidad al estudio del efecto de un dispositivo de control tiene las siguientes aplicaciones:

1. Evaluación del efecto de dispositivos existentes en la red en los márgenes de estabilidad de los modos de voltaje
2. Análisis de la interacción entre sistemas de control
3. Evaluación del efecto de nuevos dispositivos sobre los márgenes de estabilidad del sistema

El algoritmo desarrollado para la ubicación de dispositivos de FACTS basado en el análisis de controlabilidad comprende los siguientes pasos:

- a) Se calculan los modos críticos de estabilidad de voltaje en el sistema $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$ con base en el criterio establecido en la sección 3.3
- b) Se calculan las matrices $\mathbf{W}_j^i, i=1, \dots, r, j=1, \dots, N_{facts}$ donde N_{facts} representan el número de dispositivos de control considerados y se calculan los valores singulares mínimos para cada alternativa de compensación y modo de interés mediante la ecuación (4.20)
- c) Se ordenan las alternativas de control en orden decreciente en función del valor singular mínimo

4.5 ALGORITMO COMPUTACIONAL

El procedimiento global para la evaluación de la estabilidad de voltaje y desarrollo de acciones correctivas se muestra en la Fig. 4.1.

Etapa 1. Determinación del límite de cargabilidad. La determinación del punto de máxima cargabilidad del sistema se describe de manera general en la sección 3.3.2 de esta tesis. En este proceso el aumento en la demanda y generación del sistema se realiza de la siguiente manera:

$$P_G^{ACT} = k P_G^{CBO}$$

$$P_L^{ACT} = k P_L^{CBO}$$

$$Q_L^{ACT} = k Q_L^{CBO}$$

Donde :

$$k = (k + \Delta k) > 1$$

Δk Es el incremento porcentual constante en p.u.

P_G^{CBO} Potencia activa de generación del CBO

P_L^{CBO} Potencia activa de carga del CBO

Q_L^{CBO} Potencia reactiva de carga del CBO

P_G^{ACT} Potencia activa de generación actualizada

P_L^{ACT} Potencia activa de carga actualizada

Q_L^{ACT} Potencia reactiva de carga actualizada

La potencia reactiva requerida en cada caso se determina mediante la solución de un estudio de flujos de potencia. En el estudio se representan todos los efectos no lineales en el sistema que puedan afectar la determinación del punto crítico, específicamente los límites de potencia reactiva en los generadores y compensadores estáticos de VARs.

- Se calcula la matriz Jacobiana reducida J_R^Q y se calculan los valores singulares y los valores propios del sistema, para verificar la condición de estabilidad de voltaje. En la vecindad de punto crítico se disminuye el incremento proporcional de la carga en la vecindad del límite de cargabilidad utilizando un criterio de convergencia entre una solución de flujos de potencia y la solución correspondiente al caso previo. El proceso aunque heurístico, permite obtener una buena aproximación al punto de cargabilidad máxima
- Se evalúa la respuesta del sistema ante contingencias críticas para determinar la condición más débil de operación y se analiza la influencia de la carga en la estabilidad de voltaje

Etapa 2. Determinación de áreas críticas y elementos con mayor participación en el problema de inestabilidad de voltaje. Una vez determinado el límite de cargabilidad del sistema se identifican las zonas del sistema propensas a sufrir problemas de

inestabilidad de voltaje así como las diferentes participaciones que tienen los diversos elementos del sistema en el fenómeno con base en el procedimiento descrito en el capítulo anterior.

Etapa 3. Ubicación de dispositivos de control y desarrollo de medidas correctivas. La ubicación de dispositivos se realiza con base en el criterio establecido en la sección 4.4.

Etapa 4 Evaluación de las medidas de refuerzo. Una vez que los dispositivos de compensación se han ubicado basándose en el criterio anterior se realiza el siguiente procedimiento:

- Se verifica el aumento de la estabilidad del sistema, es decir, el aumento en la magnitud del valor singular crítico
- Si el aumento no es suficiente se evalúan otras configuraciones de compensación, utilizando las siguientes alternativas:

Se incrementa la capacidad del dispositivo

- Se compara el impacto del mismo dispositivo ubicado en otro de los nodos críticos

Se compara el impacto de la mejor compensación (shunt o serie), respecto al aumento en los márgenes de transmisión de potencia

La actuación de dos o más dispositivos en cualquier configuración, serie serie o serie - paralelo

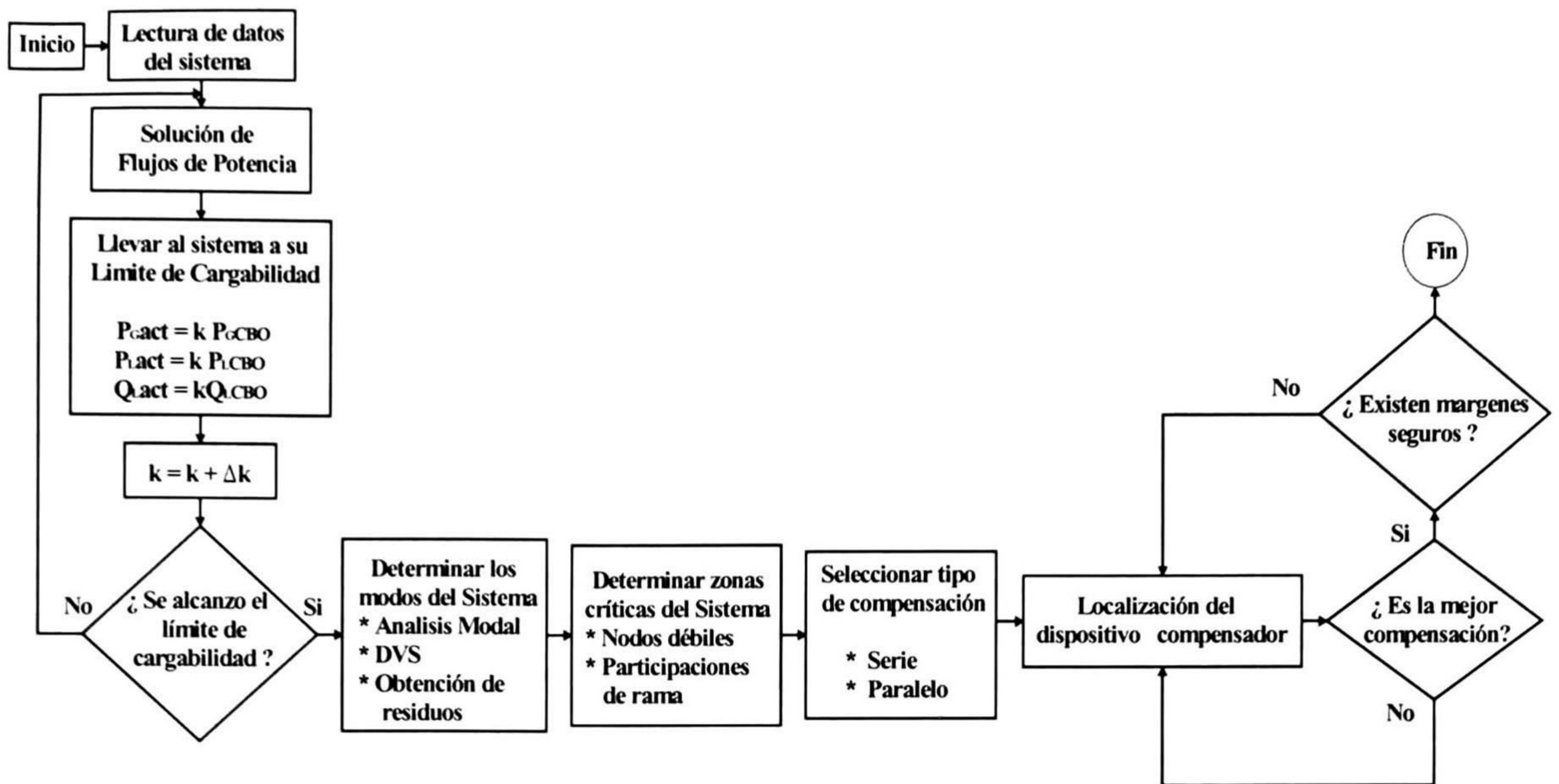


Figura 4.3.- Diagrama de flujo del algoritmo computacional para el análisis de estabilidad de voltaje en estado estable y la implementación de medidas correctivas

Donde:

P_{GCBO} Es la potencia Activa de generación para el **CBO**

P_{LCBO} Es la potencia Activa de carga para el **CBO**

Q_{LCBO} Es la potencia Activa de carga para el **CBO**

P_{Gact} Es la potencia Activa de generación actualizada

P_{Lact} Es la potencia Activa de carga actualizada

Q_{Lact} Es la potencia Activa de carga actualizada

Capítulo 5

APLICACIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se evalúa la aplicación práctica de los métodos de análisis desarrollados para analizar la estabilidad de voltaje y desarrollar medidas de refuerzo basadas en la aplicación de dispositivos de FACTS. Los métodos se utilizan para determinar las zonas más débiles del sistema así como para determinar las localizaciones óptimas de dispositivos de compensación. Se discuten algunas de las ventajas y limitaciones de estas técnicas, y se evalúa el desempeño de las mismas para mejorar el proceso de solución y la interpretación de los resultados obtenidos.

La organización de este capítulo es la siguiente. En la sección 5.2 se presenta la aplicación de los métodos desarrollados al estudio de la estabilidad de voltaje en un sistema simplificado. Se analiza la capacidad del enfoque de análisis lineal para determinar en forma precisa los elementos del sistema con mayor participación en el fenómeno de inestabilidad de voltaje. Específicamente se determinan los nodos y ramas débiles del sistema. Los resultados obtenidos se comparan con los reportados en la literatura con el propósito de validar la exactitud de la implementación de la metodología. En la sección 5.3 se presenta la aplicación del método a un sistema real. Se determinan los modos críticos del sistema así como los elementos con mayor influencia en el fenómeno de estabilidad de voltaje; se discuten sus ventajas y limitaciones en el contexto del análisis de sistemas complejos. Finalmente, se analiza el efecto de dispositivos de FACTS para mejorar el límite de estabilidad de voltaje en estado estacionario; específicamente, Compensadores Estáticos de VARs (CEVs), Controladores Unificados de Flujos de Potencia (CUFP) y Capacitores Conectados en Serie (CCS). Los resultados obtenidos se comparan con el análisis de las curvas P-V y V-Q para diferentes condiciones de operación.

5.2 ANALISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN UN SISTEMA SIMPLIFICADO

5.2.1 Descripción del sistema

En la figura 5.1 se muestra la configuración del sistema en estudio [2,59]. El sistema representa fundamentalmente, a una red eléctrica de gran capacidad representada por los generadores G1 y G2 suministrando potencia a una zona de carga a través de 5 líneas de transmisión de 500 kV. La zona de carga incluye una región de carga industrial en el bus B7 y una zona de carga residencial y comercial representada por el nodo B10. El control de voltaje en la zona de carga se realiza mediante bancos de capacitores y el ajuste automático de derivación en el transformador T6.

Los parámetros de la red en estudio así como el caso base de operación considerado, se describen en el Apéndice A1.

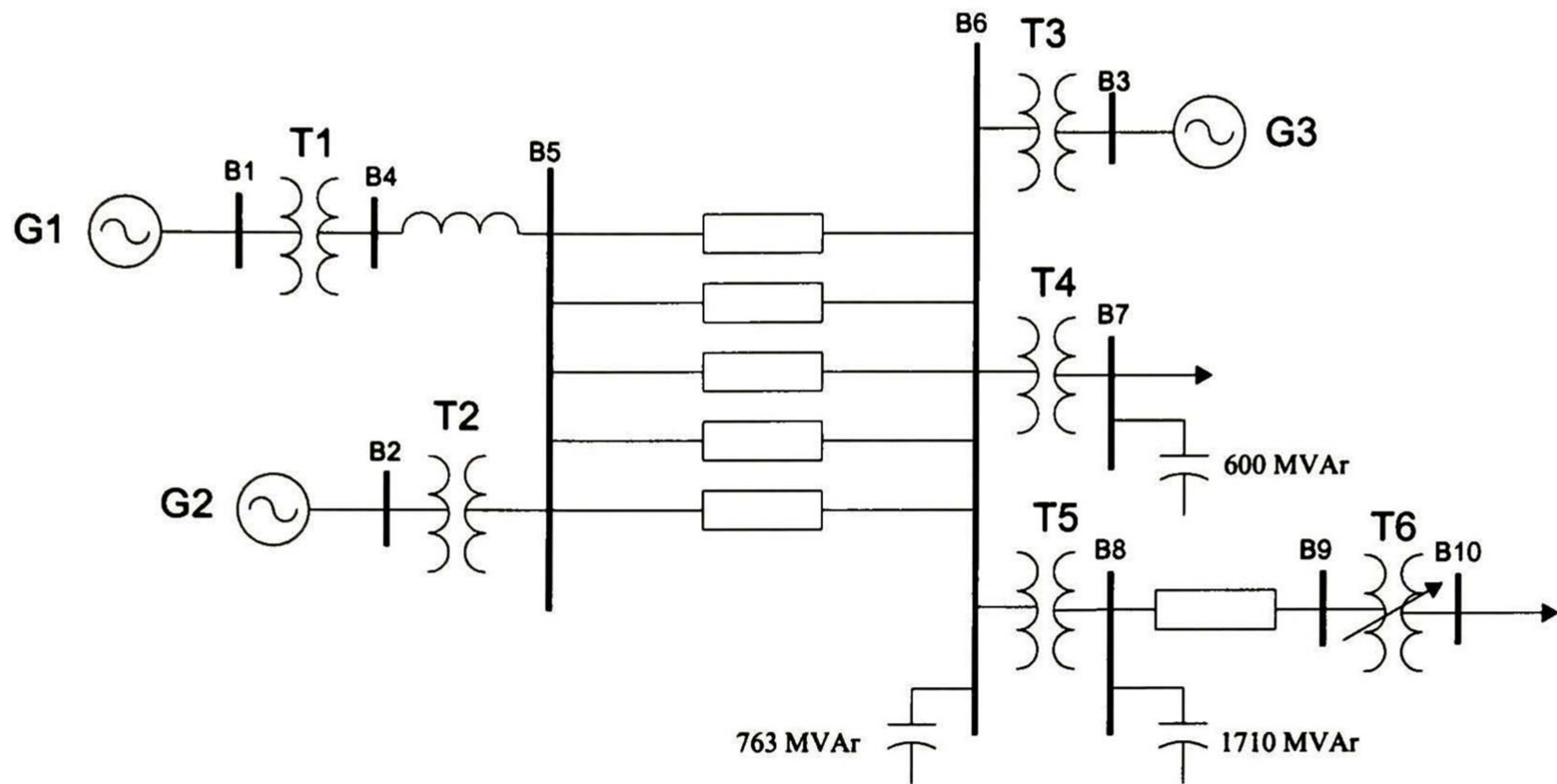


Figura 5.1.- Sistema de prueba de tres generadores [2]

5.2.2 Validación del programa computacional

En esta sección se presenta una comparación entre los resultados obtenidos en este trabajo con resultados descritos en la literatura. Con la finalidad de permitir una comparación detallada con los resultados obtenidos por otros investigadores, la carga se representa como potencia constante y se consideran límites de potencia reactiva en todos los generadores.

En el estudio se consideran los siguientes casos de operación obtenidos de la modificación de la carga del sistema:

Caso 1: La carga total del sistema es de 6655 MW y 1986 MVar

Caso 2: La carga total del sistema es de 6755 MW y 2016 MVar

5.2.2.1 Determinación de los elementos críticos del sistema

El modelo reducido V-Q del sistema en estudio contiene siete modos de estabilidad de voltaje, asociados a la representación de los nodos de carga. Los modos de voltaje se calcularon para la matriz Jacobiana reducida y se compararon con los valores singulares obtenidos para la matriz J. En las Tablas 5.1a y 5.1b se muestran los valores propios y los valores singulares obtenidos mediante el programa VOLSTAB desarrollado en este trabajo

para los dos casos de interés. Los resultados obtenidos se comparan con los resultados referidos en la literatura [59].

El análisis muestra que los valores propios del sistema reducido obtenidos del análisis modal de la matriz J_R^Q son muy cercanos a los valores singulares obtenidos de la matriz J . Para el modo crítico λ_1 , se tiene cierta diferencia con los resultados presentados en la literatura, atribuibles principalmente a las características de modelado, particularmente en la representación del rango de operación del transformador con cambio automático de taps modelado en el bus B10. El cálculo de factores de participación en la Tabla 5.1b muestra también un grado aceptable de precisión.

Tabla 5.1a
Comparación entre los valores propios y valores singulares obtenidos y los resultados descritos en [59] para el caso 1 de operación

| Modo | VOLSTAB | | Valor propio (λ) en Referencia [59] |
|------|----------------------------|-----------------------------|---|
| | Valor Propio (λ) | Valor Singular (σ) | |
| 1 | 12.5485 | 12.5383 | 11.4 |
| 2 | 150.0469 | 150.0648 | 151.0 |
| 3 | 439.4935 | 439.5278 | 456.4 |
| 4 | 597.6019 | 597.6507 | * |
| 5 | 1007.1286 | 1007.1661 | * |
| 6 | 1329.5411 | 1330.0266 | * |
| 7 | 2031.8848 | 2032.1593 | * |

* Información no proporcionada en [59]

Tabla 5.1.b
Comparación de resultados para el caso 2 de operación

| VOLTSTAB | | | | Referencia [59] | | | |
|---------------------|-----------------|--------------------|-----------------|---------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| Participación nodal | | Participación rama | | Participación nodal | | Participación rama | |
| Bus | FP _N | Rama | FP _R | Bus | FP _N | Rama | FP _R |
| 10 | 0.2966 | 8-9 | 1.0000 | 10 | 0.2890 | 8-9 | 1.0000 |
| 9 | 0.2758 | 6-8 | 0.6221 | 9 | 0.2710 | 6-8 | 0.6890 |
| 8 | 0.1792 | 5-6 | 0.4026 | 8 | 0.1760 | 5-6 | 0.4660 |

Las áreas vulnerables del sistema se determinaron siguiendo el procedimiento establecido en el capítulo 3. En la Tabla 5.2 se muestran los buses críticos identificados mediante los diferentes procedimientos investigados, específicamente: las magnitudes del subvector de voltajes del vector singular derecho (\mathbf{v}_v) y los residuos de la función de transferencia $\Delta V(s)/\Delta Q_d(s)$ para los modos de interés. Se observa que los resultados obtenidos por los diferentes métodos son bastante similares e identifican en forma correcta los nodos más vulnerables a la inestabilidad.

Tabla 5.2
Comparación de las técnicas de análisis lineal para el caso 1 de operación

| Análisis Modal | | | DVS | | | Residuos | | |
|----------------|------|-----------------|------|------|----------------------------|---------------|------|-------------------------------------|
| Modo | Nodo | FP _N | Modo | Nodo | Entrada v _v | Polo (1/λ) | Nodo | $\frac{\Delta V(s)}{\Delta Q_d(s)}$ |
| 1 | 10 | 0.2875 | 1 | 10 | 0.5475 | 0.0797 | 10 | 0.0231 |
| | 9 | 0.2751 | | 9 | 0.5260 | | 9 | 0.0222 |
| | 8 | 0.1824 | | 8 | 0.4243 | | 8 | 0.0178 |
| 2 | 7 | 0.5146 | 2 | 7 | 0.7253 | 0.0067 | 7 | 0.0514 |
| | 10 | 0.1866 | | 10 | 0.4285 | | 10 | 0.0318 |
| | 6 | 0.1347 | | 6 | 0.3634 | | 9 | 0.0258 |
| 3 | 5 | 0.5268 | 3 | 5 | 0.7273 | 0.0023 | 5 | 0.3872 |
| | 4 | 0.2839 | | 4 | 0.5331 | | 4 | 0.2839 |
| | 7 | 0.1442 | | 7 | 0.3761 | | 7 | 0.2039 |

Para el modo 1 de voltaje, los nodos críticos identificados son B10, B9 y B8 en la zona de carga residencial del sistema. El nodo B10 muestra la participación más dominante. Es interesante observar que las zonas determinadas se traslapan indicando que la acción de control en una de ellas tendría un efecto en las zonas asociadas.

5.2.2.2 Determinación de ramas débiles

Las ramas débiles se calcularon utilizando relaciones de sensibilidad y los resultados obtenidos se compararon con los factores de participación de rama. En la tabla 5.3 se describen las ramas débiles determinadas mediante el análisis de factores de participación y el análisis de la sensibilidad de los valores singulares al cambio en la reactancia serie de las líneas de transmisión $\left(\frac{\partial \sigma}{\partial X_{ser}}\right)$ para el modo crítico. Los valores se normalizan con respecto a la mayor participación.

Tabla 5.3
Ramas débiles del sistema para el modo crítico identificadas mediante factores de participación y el análisis de sensibilidad para el caso 1 de operación

| Rama | FP _R * | Rama | $\frac{\partial \sigma}{\partial X_{serie}}$ * |
|-------|-------------------|--------|--|
| 6 – 8 | 1.0000 | 9 – 10 | 1.0000 |
| 8 – 9 | 0.5740 | 8 – 9 | 0.8462 |
| 5 – 6 | 0.3726 | 6 – 8 | 0.6125 |
| 4 – 5 | 0.3463 | 6 - 7 | 0.4828 |

* Valores normalizados

El análisis de resultados muestra que las líneas con mayor participación en el modo crítico son aquellas que inciden directamente al área crítica: obsérvese, sin embargo, que el análisis de sensibilidades permite una mayor precisión en la identificación de la zona crítica, identificando las tres ramas que inciden al nodo más vulnerable.

5.2.2.3. Determinación de la condición de máxima cargabilidad

Para determinar la condición de máxima cargabilidad, la demanda del sistema se incrementó en pasos fijos, manteniendo constante el factor de potencia. La potencia activa se ajustó de manera proporcional al cambio en la carga. En cada condición de operación, se resolvió un estudio de flujos de potencia y se analizó la estabilidad del modo crítico. La condición de máxima cargabilidad determinada corresponde a un nivel de carga de 7116.36 MW y 2123.68 MVAR; aproximadamente 6.8% mayor que el caso base de operación.

En la Tabla 5.4 se muestran los valores propios y los valores singulares mínimos obtenidos en el estudio así como los nodos con mayor participación en estos modos. Se puede observar que las magnitudes de las entradas del vector singular derecho y la magnitud de los residuos aumentan (refiérase a la Tabla 5.2), proporcionando una medida del grado de estrés del sistema. En este caso, las zonas críticas 1 y 2 del sistema permanecen localizadas alrededor de los nodos B10 y B9. Es importante observar que para este sistema, la estabilidad de voltaje en estado estable esta determinada básicamente por el modo 1.

Tabla 5.4
Modos críticos de voltaje para la condición de máxima cargabilidad
mostrando los buses con mayor participación en los modos críticos

| Modo | DVS | | Residuos | | |
|------|-----|---------|-------------------------|------|-------------------------------------|
| | Bus | $ v_v $ | Polo ($1/\lambda$) | Nodo | $\frac{\Delta V(s)}{\Delta Q_d(s)}$ |
| 1 | 10 | 0.5630 | 37.1853 | 10 | 0.0251 |
| | 9 | 0.5377 | | 9 | 0.0239 |
| | 8 | 0.4156 | | 8 | 0.0185 |
| 2 | 7 | 0.7328 | 0.0082 | 7 | 0.0486 |
| | 10 | 0.4194 | | 10 | 0.0311 |
| | 9 | 0.3758 | | 9 | 0.0248 |
| 3 | 5 | 0.6981 | 0.0025 | 5 | 0.3336 |
| | 4 | 0.4734 | | 4 | 0.2249 |
| | 7 | 0.4212 | | 7 | 0.2132 |

5.2.3 Aplicación de medidas de refuerzo del sistema

El análisis anterior sugiere que la aplicación de dispositivos de control en las zonas críticas puede mejorar las características de estabilidad del sistema. De este análisis se seleccionaron los nodos B7 y B10 así como las ramas incidentes a la zona crítica (rama 8-9) para ubicar medidas de refuerzo.

Los dispositivos considerados tienen las siguientes características:

- a) *Compensador estático de VARs (CEV)*: $Q_{\max}=-0.65$ p.u., $Q_{\min}=0.95$ p.u., $V_{\text{ref}}=1.03$ p.u., $M=3\%$

- b) *Controlador unificado de flujo de potencia (CUFP):* $V=1.03$ p.u, $P_G=0.3$ p.u. en el nodo PV, Q_L carga=0.3 p.u. en el nodo PQ. Se consideran límites de potencia reactiva en el nodo PV

En la Tabla 5.5 se muestra el efecto de la aplicación de dispositivos de control en los elementos débiles del sistema. El análisis muestra que la acción de control mejora en forma significativa los márgenes de estabilidad del sistema de los tres valores singulares mínimos sin acciones indeseables de interacción.

Tabla 5.5
Comparación del efecto de la aplicación de dispositivos de control en los valores singulares de menor magnitud

| Alternativa de control | Valores singulares críticos | | |
|--|-----------------------------|------------|------------|
| | σ_1 | σ_2 | σ_3 |
| Sin dispositivos de control | 0.0268 | 121.6266 | 407.8020 |
| CEV en el bus B10 | 5.8175 | 133.8070 | 420.8901 |
| CEV en el bus B7 | 4.7889 | 132.7651 | 419.6953 |
| UPFC en la línea 8-9 | 97.2696 | 421.7157 | 565.5698 |
| UPFC en la línea 8-9 y CEV en el bus B7 | 100.6954 | 424.477 | 568.8632 |

5.3 ANALISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN UN SISTEMA REAL

5.3.1 Descripción del sistema de estudio

El sistema en estudio representa un equivalente principal de la red de transmisión de 230, 138 y 69 kV del Sistema Interconectado de Guatemala (SIG) y su interconexión con los sistemas vecinos. En la Figura 5.2 se muestra un diagrama unifilar simplificado de este sistema mostrando los niveles de tensión y la ubicación de los generadores. El caso base de operación corresponde a un nivel de demanda total del sistema de 711.4 MW y 234.52 MVar.

El modelo del SIG utilizado en estos estudios contiene 116 buses, 98 líneas de transmisión y 33 generadores: el control de voltaje en esta red se efectúa mediante el control de la excitación en generadores así como la utilización de bancos de capacitores en paralelo en puntos estratégicos de la red.

Para propósitos de estudio, se representan los límites de potencia reactiva en todos los generadores así como la operación de los bancos de capacitores.

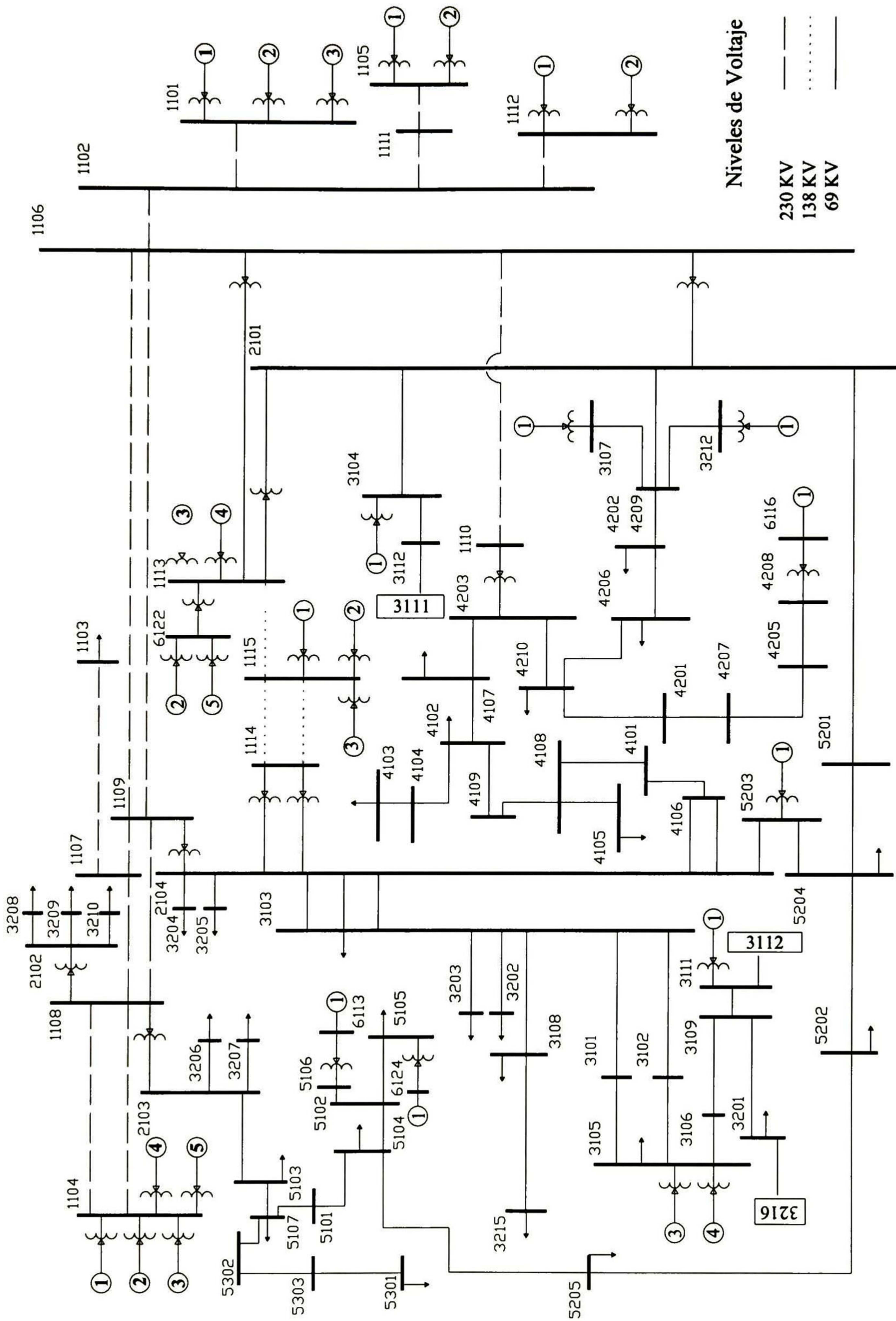


Figura 5.2.- Diagrama unifilar del sistema de estudio

5.3.2 Determinación de la condición de máxima cargabilidad del sistema

La condición de máxima cargabilidad se determinó siguiendo el procedimiento establecido en la sección 5.2. En la Figura 5.3 se muestra el gráfico de la variación del MVS asociado a la matriz \mathbf{J} en función del nivel de carga real y reactiva del sistema. Con la finalidad de ilustrar el comportamiento del método propuesto, se muestran también el valor singular mínimo y el valor propio mínimo de la matriz Jacobiana reducida $\mathbf{J}_R^Q, \sigma_{\min}(\mathbf{J}_R^Q)$ y $\lambda_{\min}(\mathbf{J}_R^Q)$, respectivamente.

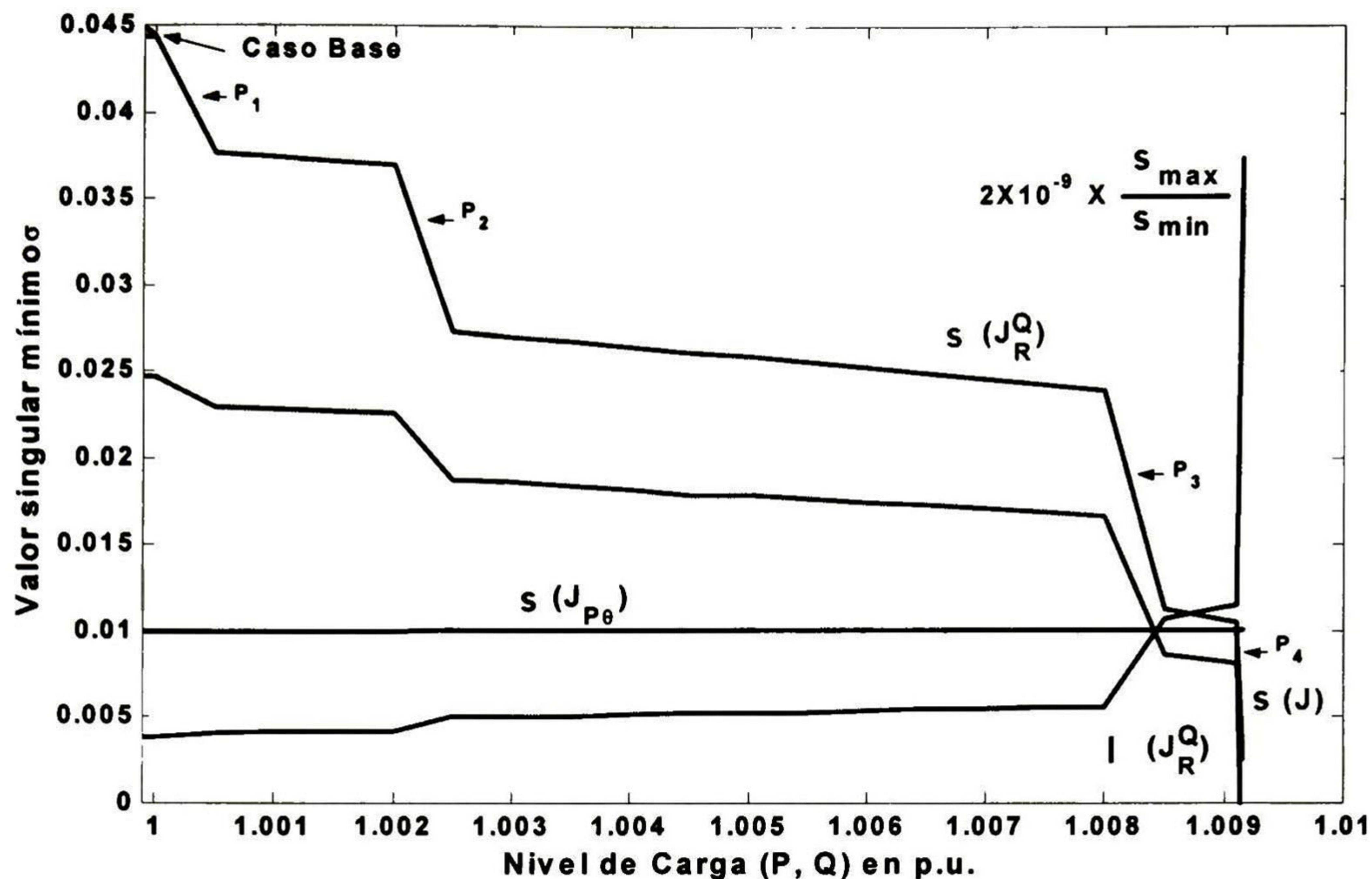
Como se puede observar, los diferentes enfoques de análisis permiten determinar en forma prácticamente idéntica la condición de máxima cargabilidad: en el punto crítico, el MVS de la matriz \mathbf{J} es prácticamente cero y el valor propio asociado al modo crítico cambia de signo revelando la presencia de inestabilidad de voltaje.

El análisis de los resultados en la Figura 5.3 conduce a las siguientes conclusiones:

- El sistema alcanza la condición de inestabilidad para un nivel de carga del 100.9 % respecto al caso base. Esto es, la condición de inestabilidad se obtiene para un incremento de carga menor al 1% respecto al caso base de operación revelando el pobre margen de estabilidad del sistema
- Las curvas muestran cambios bruscos de pendiente cuando un generador alcanza sus límites de potencia reactiva: el valor singular mínimo disminuye, y aumenta el valor singular máximo. Como consecuencia, aumenta el débil condicionamiento de la matriz Jacobiana como se explicó en el Capítulo 3
- En la condición de inestabilidad, todos los generadores agotan su reserva de potencia reactiva, con excepción de los generadores 6101-6105 (no se muestran en el diagrama). Esto es, la condición de inestabilidad coincide con la pérdida de controlabilidad Q-V en nodos de generación en la zona de interés
- El análisis del valor singular mínimo asociado a la matriz $\mathbf{J}_{P\theta}$, muestra que el sistema no exhibe problemas de estabilidad angular en estado estable.

Cabe destacar en la Figura 5.3 que la relación $\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$ aumenta en la condición de singularidad indicando el débil condicionamiento de la matriz Jacobiana. Esta relación proporciona una primera medida de la cercanía a la condición de colapso de voltaje.

Puede observarse también, que el análisis de valores singulares coincide con el nodo crítico de menor magnitud como se muestra en el gráfico del perfil de voltaje del sistema para la condición de máxima cargabilidad en la Figura 5.4.



S

Figura 5.3.-Comparación del comportamiento del valor singular y el valor propio mínimo para la matrices J y J_R^Q

Para facilitar la interpretación de los resultados, en la Tabla 5.6 se sintetizan los cinco valores singulares y valores propios de menor magnitud correspondientes al caso base de operación y a la condición de máxima cargabilidad. Se observa que los valores propios y los valores singulares presentan un grado de diferencia para la condición de máxima cargabilidad, enfatizando un cierto grado de simetría de la matriz Jacobiana. Es importante señalar que el valor propio asociado al modo crítico de voltaje es negativo ($\lambda_1 = -0.0026$) indicando que el sistema es inestable en el sentido de voltaje. En esta caso, sin embargo, el SIG exhibe dos modos de voltaje (modos 1 y 2 en la Tabla 5.6) con un margen reducido de estabilidad.

Tabla 5.6
Valores propios y valores singulares de menor magnitud

| Modo | Caso base | | Condición de máxima cargabilidad | |
|------|-------------|------------------|----------------------------------|------------------|
| | $\sigma(J)$ | $\lambda(J_R^Q)$ | $\sigma(J)$ | $\lambda(J_R^Q)$ |
| 1 | 0.0443 | 0.0443 | 0.0026 | -0.0031 |
| 2 | 0.0993 | 0.0993 | 0.0834 | 0.0897 |
| 3 | 0.1848 | 0.1848 | 0.1527 | 0.1670 |
| 4 | 0.2896 | 0.2896 | 0.2264 | 0.2762 |
| 5 | 0.3519 | 0.3520 | 0.2720 | 0.3142 |

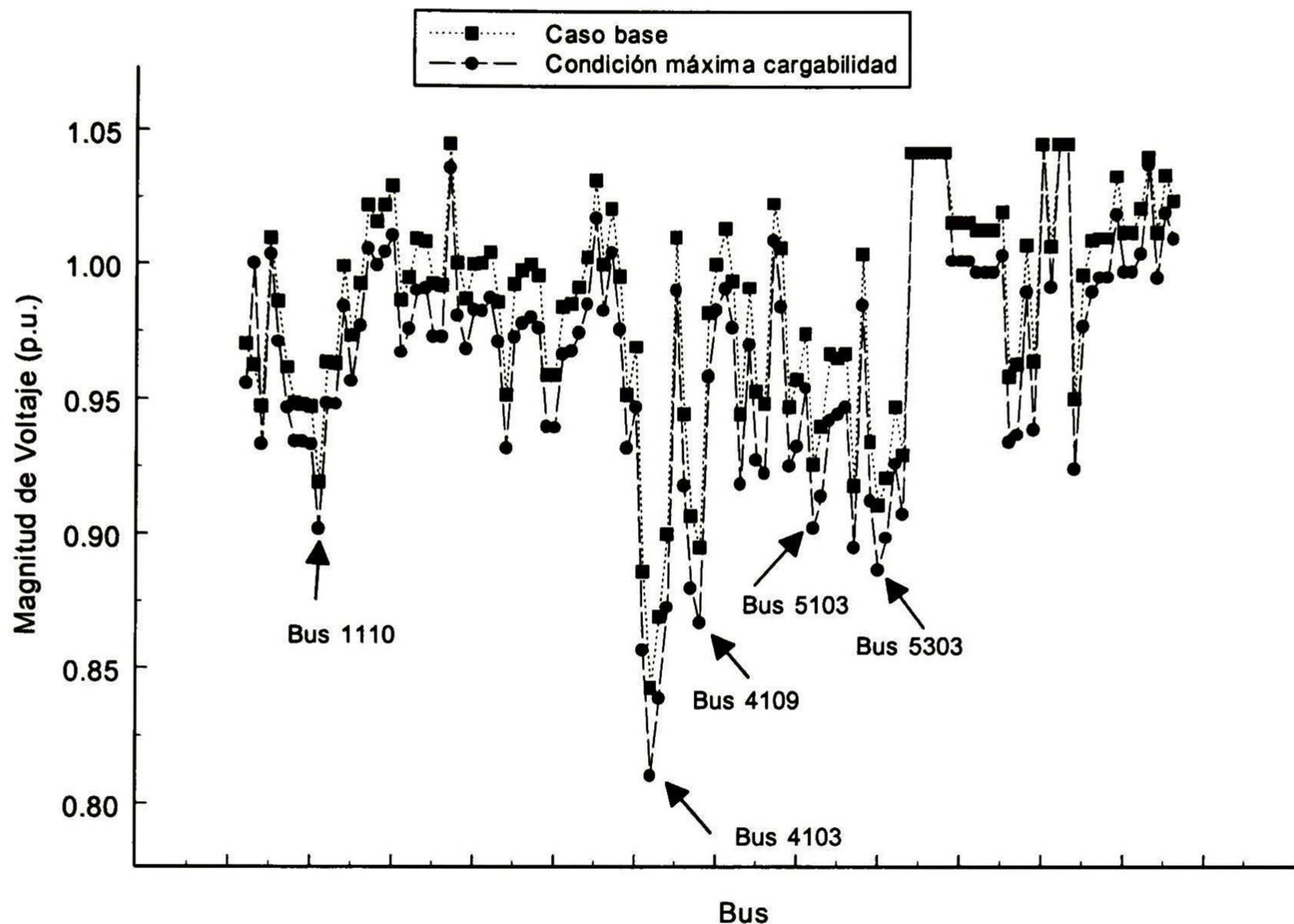


Figura 5.4.- Gráfico del perfil de voltaje del sistema para la condición de máxima cargabilidad

5.3.3 Áreas críticas de voltaje

5.3.3.1 Nodos críticos

En la Tabla 5.7 se muestran los nodos con mayor magnitud en el subvector de voltajes del vector singular derecho (v_v). Para el valor singular crítico σ_1 , el análisis del vector singular derecho identifica varios nodos al final de una red radial en la zona de 69 kV como los nodos con mayor influencia en el fenómeno: el bus crítico (nodo 4103) se encuentra al final de la red radial. Se observa también, que la zona asociada a σ_2 incluye dos generadores operando sin reservas de potencia reactiva (buses 6124 y 6113) sugiriendo la necesidad de un modelo más detallado de estos generadores incluyendo la representación de los límites de potencia reactiva.

Las áreas críticas del sistema obtenidas para los cinco valores singulares de menor magnitud se muestran en la Figura 5.5. Cada área crítica se forma al unir los nodos con mayor participación en el vector singular derecho. Es interesante observar en este estudio, sin embargo, que la mayoría de los nodos del sistema presentan una contribución similar, indicando la debilidad general del sistema. Este aspecto se discute a continuación en mayor profundidad.

La naturaleza de la participación de los nodos del sistema en el modo crítico se muestra de manera más clara en la Figura 5.6, indicando las tres áreas eléctricas asociadas a los valores singulares de menor magnitud. Obsérvese que el vector singular muestra magnitudes similares para los nodos del sistema como se mostró en el análisis de participaciones nodal.

Tabla 5.7
Elementos de voltaje del vector singular derecho correspondientes los valores singulares de menor magnitud

| $\sigma_1=0.0026$ | | $\sigma_3=0.08342$ | | $\sigma_6=0.1527$ | | $\sigma_7=0.2264$ | | $\sigma_8=0.2720$ | |
|-------------------|---------|--------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|
| <i>Bus</i> | $ v_v $ | <i>Bus</i> | $ v_v $ | <i>Nodo</i> | $ v_v $ | <i>Bus</i> | $ v_v $ | <i>Bus</i> | $ v_v $ |
| 4103 | 0.1325 | 6124 | 0.4386 | 6116 | 0.5993 | 4103 | 0.2806 | 5301 | 0.3572 |
| 4104 | 0.1269 | 5105 | 0.3923 | 4208 | 0.3609 | 5301 | 0.2473 | 5303 | 0.3188 |
| 4102 | 0.1228 | 6113 | 0.3455 | 4205 | 0.3281 | 4104 | 0.2329 | 5302 | 0.2133 |
| 4109 | 0.1188 | 5106 | 0.3396 | 4207 | 0.2406 | 5303 | 0.2243 | 4103 | 0.2081 |
| 4105 | 0.1151 | 5102 | 0.3309 | 4201 | 0.1365 | 6116 | 0.2128 | 4104 | 0.1682 |
| 4108 | 0.1149 | 5104 | 0.1664 | 6124 | 0.1125 | 4102 | 0.1919 | 4102 | 0.1340 |
| 4107 | 0.1130 | 6116 | 0.1419 | 5105 | 0.0897 | 4109 | 0.1804 | 6115 | 0.1314 |
| 6114 | 0.1108 | 5205 | 0.1319 | 6113 | 0.0735 | 6124 | 0.1778 | 4109 | 0.1227 |
| 4205 | 0.1089 | 4208 | 0.1198 | 5106 | 0.0685 | 4105 | 0.1667 | 6203 | 0.1172 |
| 4208 | 0.1084 | 5101 | 0.1174 | 5102 | 0.0649 | 5302 | 0.1608 | 5107 | 0.1138 |

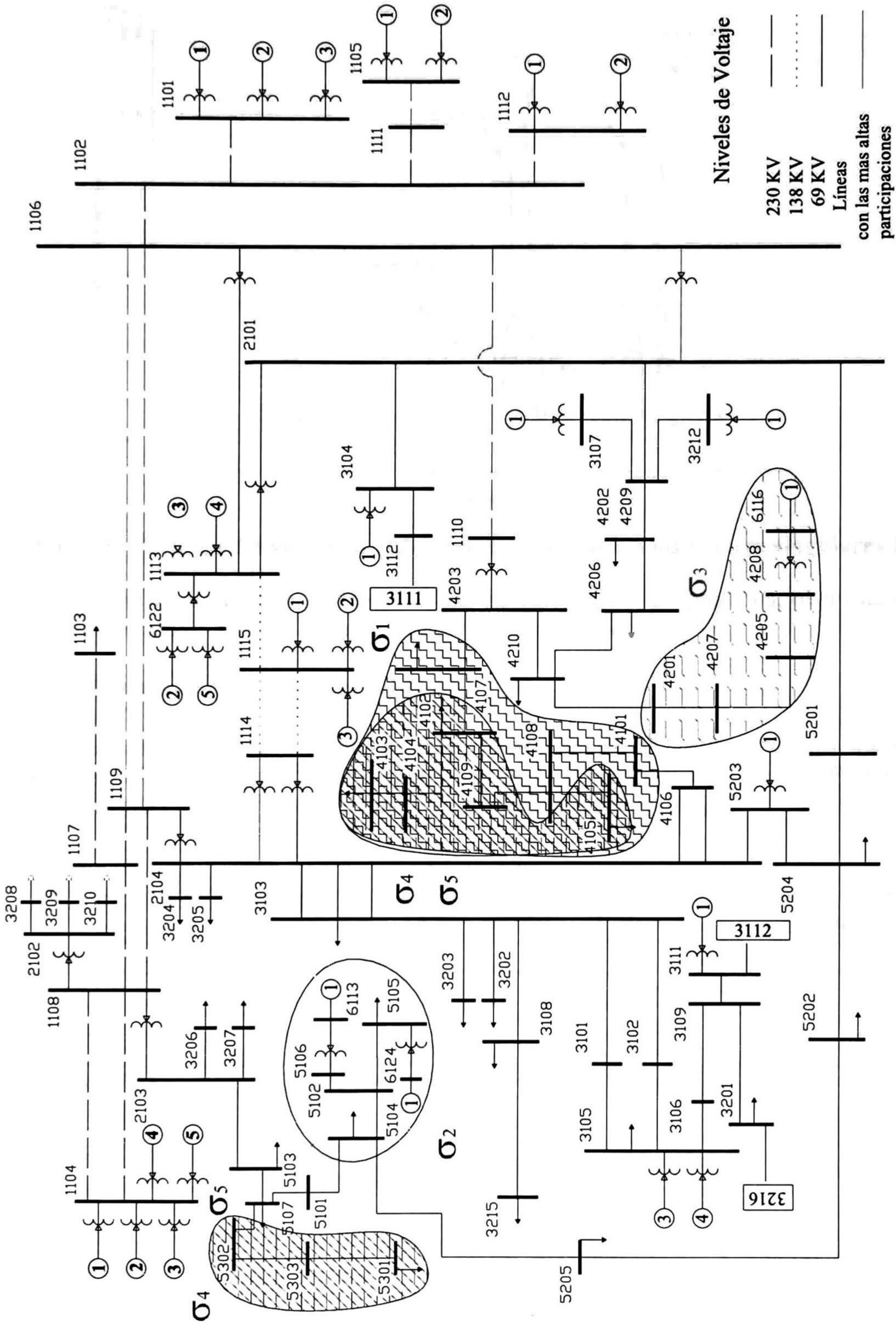


Figura 5.5.- Gráfico de las áreas asociadas a los nodos con mayor participación en los modos críticos

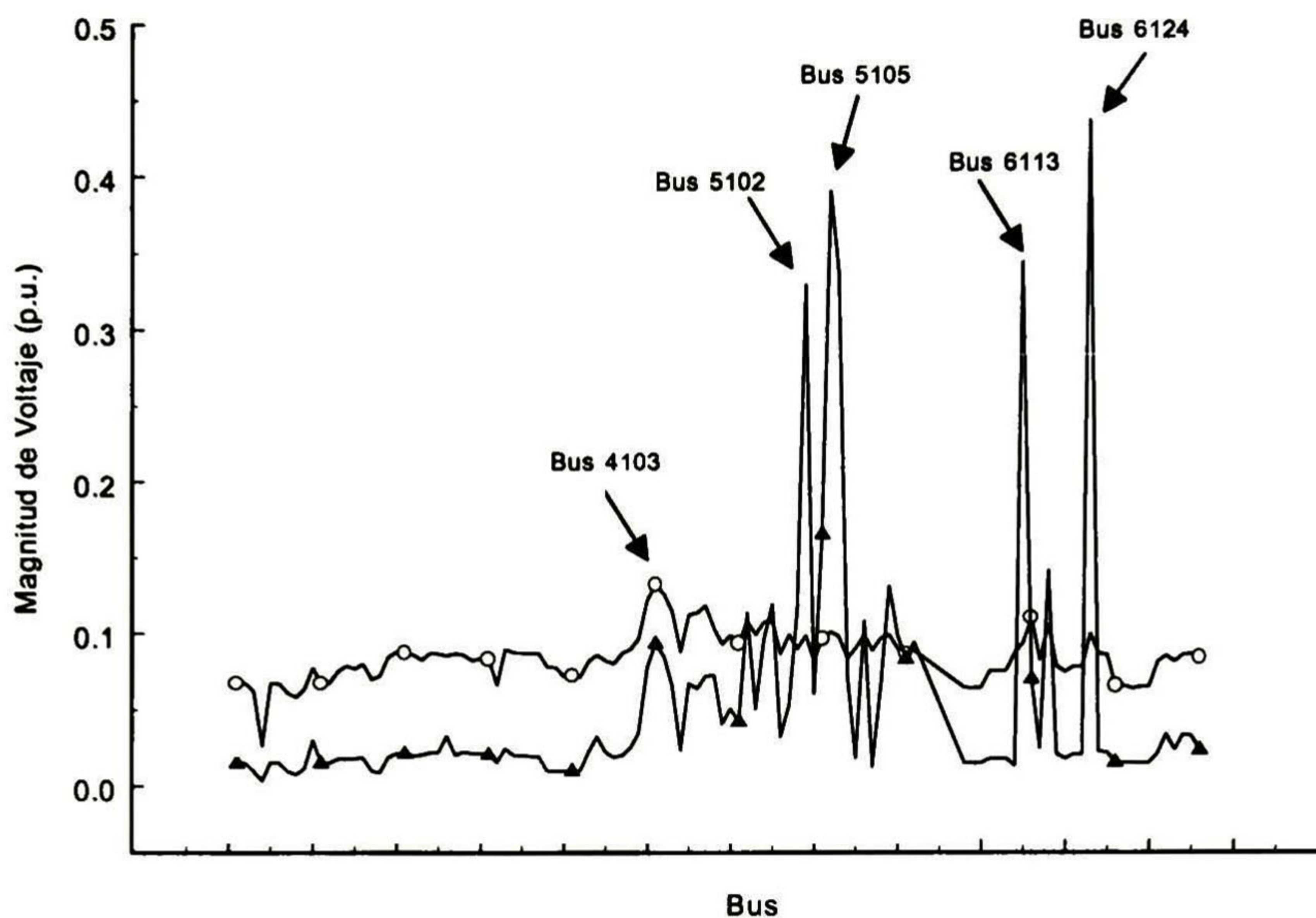


Figura 5.6.- Gráfico del vector singular derecho asociado a los valores singulares 1 y 2

El análisis de residuos, controlabilidad y sensibilidades proporciona, para este caso, información similar por lo que sus resultados no se muestran.

5.3.3.2 Determinación de ramas débiles

Las ramas débiles del sistema se determinaron utilizando factores de participación y el análisis de sensibilidad de valores singulares. En la Tabla 5.8 se muestran los Factores de Participación de Rama (FP_R) asociados a los modos críticos de voltaje.

Tabla 5.8
Factores de participación de rama (FP_R) asociados a los modos críticos de voltaje

| $\lambda_1 = -0.0031$ | | $\lambda_1 = 0.0897$ | | $\lambda_1 = 0.1670$ | |
|-----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|
| Rama | FP_R | Rama | FP_R | Rama | FP_R |
| 1105-1111 | 1.000 | 5102-5104 | 1.000 | 4205-4207 | 1.000 |
| 1114-2104 | 0.8681 | 5101-5104 | 0.0344 | 4201-4207 | 0.8681 |
| 1106-1110 | 0.7458 | 5102-5106 | 0.0339 | 4205-4208 | 0.7458 |
| 4102-4107 | 0.7102 | 5104-5205 | 0.0225 | 4201-4210 | 0.7102 |
| 1114-1115 | 0.7060 | 5101-5107 | 0.0218 | 5102-5104 | 0.7060 |
| 1106-1109 | 0.6215 | 4102-4107 | 0.0082 | 5102-5105 | 0.6215 |
| 4102-4104 | 0.5811 | 4103-4104 | 0.0068 | 5102-5106 | 0.5811 |

El análisis de factores de participación de rama muestra, en general, que las ramas críticas asociadas al modo crítico de voltaje se encuentran en la zona de 230 kV del sistema (ramas 1105-1111 y 1114-2104). Para los otros modos, sin embargo, los factores de participación de rama identifican a líneas de transmisión dentro de las zonas de interés.

En contraste, el análisis de la sensibilidad de los valores singulares con respecto a la reactancia serie de las ramas del sistema en la Tabla 5.9 muestra que la estabilidad de voltaje esta asociada a las ramas dentro de las áreas críticas o que inciden en ellas. Para el MVS (σ_1), las ramas que conectan al nodo crítico con el resto del sistema (4103-4104 y 4102-4104) muestran la mayor sensibilidad. El análisis identifica también de manera correcta a los enlaces 6124-5105 y 6116-4208 como las ramas más débiles asociadas a los valores singulares σ_2 y σ_3 , respectivamente.

Tabla 5.9
Valores normalizados de las sensibilidades de los valores singulares con respecto al cambio en la reactancia serie de las ramas

| $\sigma_1 = 0.0026$ | | $\sigma_2 = 0.08341$ | | $\sigma_3 = 0.1528$ | |
|---------------------|---|----------------------|---|---------------------|---|
| Rama | $\left \frac{\partial \sigma}{\partial X_{serie}} \right $ | Rama | $\left \frac{\partial \sigma}{\partial X_{serie}} \right $ | Rama | $\left \frac{\partial \sigma}{\partial X_{serie}} \right $ |
| 4103-4104 | 1.000 | 6124-5105 | 1.000 | 6116-4208 | 1.000 |
| 4102-4104 | 0.8779 | 5102-5105 | 0.7525 | 4205-4208 | 0.4702 |
| 4102-4109 | 0.8063 | 6113-5106 | 0.6596 | 4205-4207 | 0.3299 |
| 4108-4109 | 0.7429 | 5102-5106 | 0.6421 | 4201-4207 | 0.1591 |
| 4102-4107 | 0.7404 | 5102-5104 | 0.3961 | 4201-4210 | 0.0441 |
| 4105-4108 | 0.7199 | 5104-5205 | 0.1298 | 6124-5105 | 0.0147 |
| 6114-4107 | 0.6950 | 5101-5104 | 0.1214 | 5102-5105 | 0.0101 |

5.3.4 Aplicación de medidas de refuerzo

En esta sección se evalúa la aplicación de dispositivos de control basados en tecnología de FACTS, para mejorar los límites de estabilidad de voltaje del sistema. Los estudios presentados incluyen la determinación de las ramas y nodos con mayor influencia en los valores singulares críticos y la aplicación de CEVs y CUFp para extender el límite de estabilidad de voltaje.

5.3.4.1 Ubicación de dispositivos de control

La ubicación de dispositivos de control se determinó mediante el análisis de residuos de funciones de transferencia y el análisis de controlabilidad de los modos de interés con respecto a la señal de entrada de cada dispositivo (ubicación). Los residuos asociados al efecto de control se calculan siguiendo el procedimiento propuesto en el Capítulo 4.

En la Tabla 5.10 se presentan los residuos asociados a la función de transferencia $\Delta V(s)/\Delta \beta_{cev}(s)$ en orden de magnitud decreciente. Los resultados muestran una coincidencia cercana con el análisis del vector singular derecho en la Tabla 5.7 para los dos modos de voltaje más críticos. Se observa también una ligera discrepancia en el orden de importancia para el tercer modo.

Como se observa, los nodos 4103 y 4104 aparecen como las mejores opciones para instalar compensación controlable en paralelo para mejorar el límite de estabilidad del modo crítico. Por otra parte, el análisis de controlabilidad conduce a conclusiones similares por lo que se describe esta información.

Tabla 5.10

Determinación de los buses con mayor influencia en los modos críticos de voltaje

| Residuos de la función de transferencia $\frac{\Delta V(s)}{\Delta \beta_{cev}(s)}$ | | | | | | | | | |
|---|--------|-----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|
| $P_1 = -319.6696$ | | $P_2 = 11.1475$ | | $P_3 = 5.9864$ | | $P_4 = 3.6206$ | | $P_5 = 3.1827$ | |
| Nodo | $ Ri $ | Nodo | $ Ri $ | Nodo | $ Ri $ | Nodo | $ Ri $ | Nodo | $ Ri $ |
| 4103 | 0.0112 | 6124 | 0.0082 | 6116 | 0.0161 | 5301 | 0.0033 | 5301 | 0.0067 |
| 4104 | 0.0107 | 5105 | 0.0072 | 4208 | 0.0098 | 5303 | 0.0029 | 5303 | 0.0059 |
| 4102 | 0.0104 | 6113 | 0.0065 | 4205 | 0.0089 | 4103 | 0.0025 | 4103 | 0.0055 |
| 4109 | 0.0099 | 5106 | 0.0063 | 4207 | 0.0066 | 4104 | 0.0021 | 4104 | 0.0045 |
| 4105 | 0.0095 | 5102 | 0.0061 | 4201 | 0.0038 | 5302 | 0.0020 | 5302 | 0.0039 |
| 4108 | 0.0094 | 5104 | 0.0029 | 6124 | 0.0031 | 6116 | 0.0019 | 4102 | 0.036 |
| 4107 | 0.0093 | 6116 | 0.0023 | 5105 | 0.0024 | 6124 | 0.0018 | 4109 | 0.0034 |
| 6114 | 0.0089 | 5205 | 0.0022 | 6113 | 0.0020 | 4102 | 0.0017 | 6114 | 0.0031 |
| 4205 | 0.0086 | 5101 | 0.0020 | 5106 | 0.0018 | 4109 | 0.0016 | 4105 | 0.0031 |
| 4208 | 0.0086 | 4208 | 0.0019 | 5102 | 0.0017 | 4105 | 0.0015 | 6116 | 0.0031 |

La ubicación de dispositivos serie se investigó de manera similar con base en el estudio de residuos y el análisis de controlabilidad. En este análisis, los factores de participación de rama y el análisis de sensibilidades de los valores singulares se utilizaron como base de comparación entre los distintos enfoques.

En la Tabla 5.11 se sintetizan las líneas identificadas mediante los diferentes criterios considerados. El análisis de los resultados obtenidos conduce a las siguientes conclusiones:

- Los coeficientes de sensibilidad $\left(\frac{\partial \sigma}{\partial X_{ser}}\right)$ identifican a las líneas de transmisión dentro del área crítica (enlaces 4103-4104 y 4102-4104 en la zona crítica de 69 kV) como las ramas más débiles en el sistema
- El análisis de residuos y controlabilidad identifican, fundamentalmente, a líneas de transmisión en la zona de 230 kV del sistema, alejadas de la zona crítica. Las líneas de transmisión en la zona de 69 kV aparecen con un menor orden de importancia en este análisis.

Tabla 5.11

Líneas identificadas por las diversas técnicas para el modo crítico del CCO

| Orden de importancia | Participación de Rama (P_{ij}) | $\frac{\partial \sigma}{\partial X_{serie}}$ | $\frac{\Delta V(s)}{\Delta X_{TCSC}(s)}$ | $\sigma_{min}(W_i^j)$ |
|----------------------|------------------------------------|--|--|-----------------------|
| 1 | 1105 – 1111 | 4103 – 4104 | 1106 – 1110 | 1107 – 1108 |
| 2 | 1114 – 2104 | 4102 – 4104 | 1106 – 1109 | 1106 – 1109 |
| 3 | 1106 – 1110 | 4102 – 4109 | 1106 – 1113 | 1107 – 1109 |
| 4 | 4102 – 4107 | 4102 – 4107 | 1106 – 2101 | 1103 – 1107 |
| 5 | 1114 – 1115 | 4105 – 4108 | 2103 – 5103 | 1106 – 1110 |
| 6 | 1106 – 1109 | 4205 – 4208 | 2101 – 4209 | 4102 – 4107 |
| 7 | 4102 – 4104 | 4205 – 4207 | 1109 – 2104 | 5101–5104 |

5.3.4.2 Aplicación de medidas de refuerzo

A continuación se presentan los resultados de la aplicación de dispositivos de control al SIG. En este análisis se adopta la siguiente metodología de estudio.

1. Se ubicaron CEVs en los nodos con mayor participación en los modos críticos
2. Se aplicaron CSCT y CUFP en las ramas más débiles
3. Se evaluó la aplicación coordinada de distintos dispositivos considerando como objetivo, el mejoramiento del límite de estabilidad de dos modos.

Finalmente se analizó el efecto de los dispositivos de control ante distintas contingencias asociadas a las ramas críticas del sistema.

En todos los estudios se consideraron dispositivos de control con las siguientes características:

- (a) CEV. Se representaron de la siguiente manera: $V_t=1.03$ p.u, $Q_{min}=-30$ MVar, $Q_{max}=30$ MVar, $M=3\%$.
- (b) CUFP. Se representaron de la siguiente manera: $V=1.03$ p.u. y $P_G = 0.3$ en el nodo PV, Q_L de carga = 0.3 p.u. en el nodo PQ, Se consideraron límites en el nodo PV
- (c) CCS. Se diseñaron para compensar el 30% de la reactancia serie de la línea de transmisión

El efecto de los dispositivos de control en los límites de estabilidad del sistema se compara en la Tablas 5.12 y 5.13 considerando la aplicación de un dispositivo para mejorar la estabilidad de un modo a la vez. Para mejorar las características de los dos valores singulares de menor magnitud se seleccionaron las mayores participaciones individuales de los dispositivos de control en cada modo y se calcularon los valores singulares. En la Tabla 5.14 se presentan los resultados obtenidos al combinar dos estrategias de control. Obsérvese que la ubicación de un dispositivo de control en el bus 6124 (nodo de generación) no se consideró de interés práctico.

Tabla 5.12
Efecto de la aplicación de CEVs y CSCT en los valores singulares críticos

| Ubicación del CEV | Valores singulares | | |
|--|--------------------|------------|------------|
| | σ_1 | σ_1 | σ_1 |
| Sin compensación | 0.0026 | 0.0897 | 0.1670 |
| Con 1 banco de capacitores (15 MVar) en bus 4103 | 0.0792 | 0.1826 | 0.2591 |
| CEV en 4103 | 0.2210 | 0.3826 | 0.4606 |
| CSCT en 1107-1108 | 0.1311 | 0.0847 | 0.1657 |
| CSCT en 1107-1109 | 0.1309 | 0.0845 | 0.1559 |
| CSCT en 4102-4107 | 0.0408 | 0.0841 | 0.1555 |

Tabla 5.13
Efecto de la aplicación de CUFP en los valores singulares críticos

| Ubicación del CUFP | Valores singulares | | |
|--------------------|--------------------|------------|------------|
| | σ_1 | σ_1 | σ_1 |
| 1107-1108 | 0.2480 | 0.2629 | 0.3844 |
| 1106-1109 | 0.2049 | 0.2570 | 0.3871 |
| 1107-1109 | 0.2064 | 0.2565 | 0.3886 |
| 1103-1107 | 0.2449 | 0.2565 | 0.3849 |
| 4102-4107 | 0.2235 | 0.3902 | 0.4617 |

Tabla 5.14
Comparación del efecto de dispositivos de control

| Alternativa de control | Valores singulares | | |
|-------------------------------------|--------------------|------------|------------|
| | σ_1 | σ_1 | σ_1 |
| CEV en bus 4103 y UPFC en 1107-1108 | 0.1371 | 0.2209 | 0.4297 |
| CEV en bus 5103 UPFC en 4102-4107 | 0.3891 | 0.4429 | 0.4718 |
| CEV en buses 4103 y 5103 | 0.3849 | 0.4430 | 0.4747 |

El análisis de resultados muestra que la aplicación de CEV y CUFP permite aumentos significativos en la magnitud de los tres valores singulares mínimos. Se observa también que las mejores alternativas de compensación (ramas 1107-1108, 1103-1107, 4102-4107) coinciden con el análisis de controlabilidad. Los otros enfoques permiten identificar las ramas de interés entre las 10 participaciones de mayor magnitud.

En general, la aplicación de CCS no se consideró una alternativa viable para mejorar los márgenes de estabilidad del sistema debido a las características de la red. Por otra parte, los resultados obtenidos para el SIG muestran que el efecto de estos dispositivos no es comparable a otras alternativas de control. Se observa también que la aplicación de un CCS puede en algunos casos afectar otros modos como lo muestran los valores singulares.

Para ubicar dos dispositivos de control, el proceso se realizó de manera secuencial. Una vez que se determinó la mejor opción para aumentar la magnitud del menor valor singular, se procedió a instalar un segundo dispositivo para aumentar la magnitud del segundo valor singular. Este procedimiento se adoptó porque al instalar un primer dispositivo, en general, la zona crítica se desplaza a la segunda zona de interés. Nótese del análisis de la Tabla 5.14 que este criterio conduce a buenos resultados de diseño. Se observó en este análisis, que la ubicación de dos dispositivos para mejorar la magnitud del valor singular crítico produce interacción entre controles (refiérase a la segunda fila en la Tabla 5.14).

Con el propósito de tener una interpretación a nivel sistema del efecto de la aplicación de dispositivos de control, se analizó el vector singular derecho considerando las diferentes alternativas de control seleccionadas. El gráfico de los componentes del vector singular se muestra en la Figura 5.7. Como se observa, la aplicación de dispositivos de control disminuye la magnitud de los componentes de voltaje del vector singular derecho asociados con el área 1. Cuando se instalan dos dispositivos de manera coordinada es posible disminuir las magnitudes de las entradas del vector singular para las áreas 1 y 2 como se muestra en la Figura 5.7.

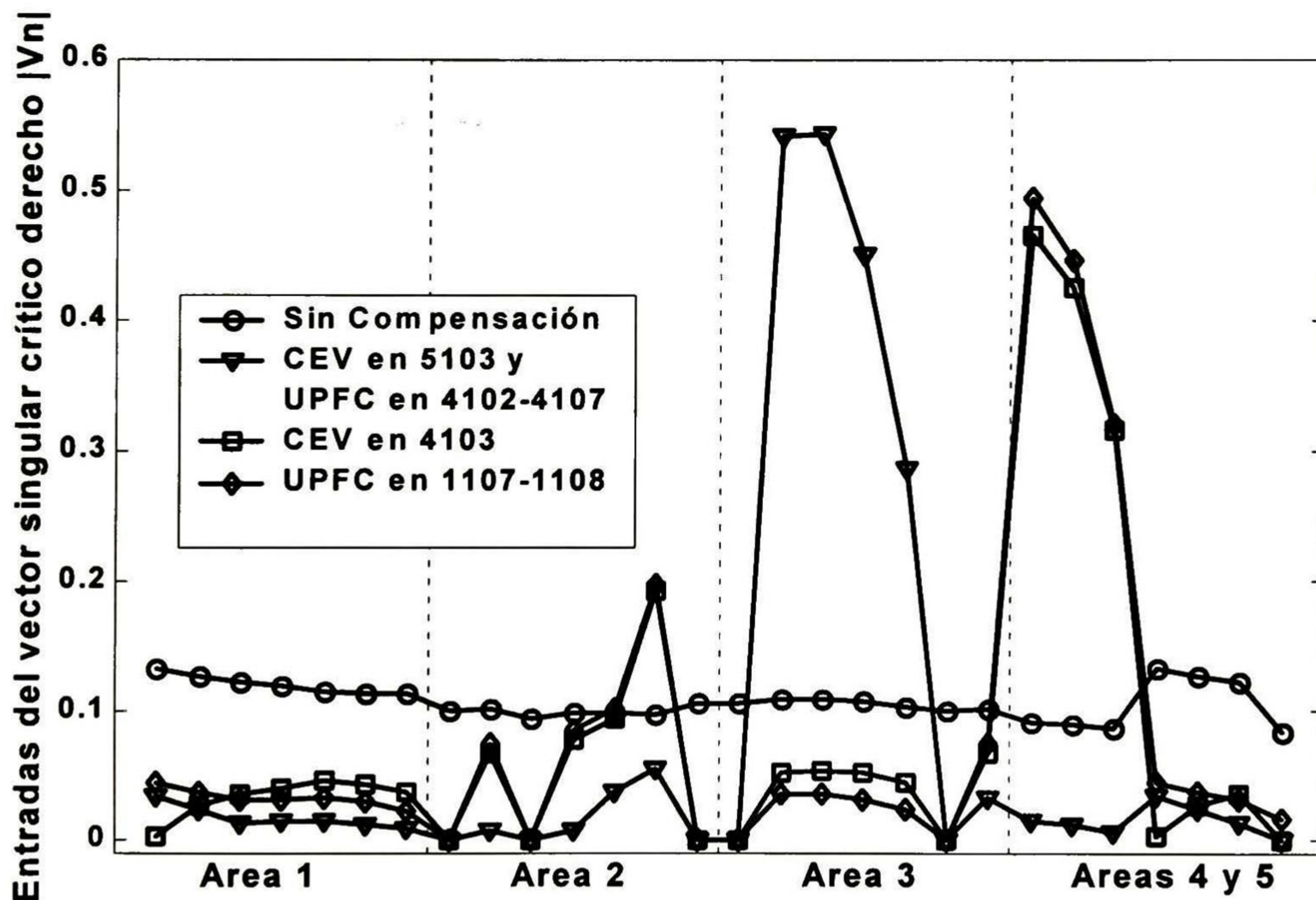


Figura 5.7.- Gráfico del subvector $|v_v|$ para las diferentes alternativas de control

Otros criterios considerados en este trabajo proporcionan información similar. En la Figura 5.8 se observan las magnitudes de los residuos para estas nuevas áreas, se observa que en la medida que la compensación estabiliza al modo también se reducen las magnitudes de los residuos: asimismo las magnitudes de los residuos asociados a los polos críticos son las mayores.

Tabla 5.15

Efecto de las distintas compensaciones en la distribución de las zonas críticas

| CEVs en los nodos 4103 y 5103 | | CEVs en los nodos 4103 y 5107 | | CEV en el nodo 5103 y UPFC en la línea 4102-4107 | |
|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| Polos críticos | Nodos asociados | Modos críticos | Nodos asociados | Modos críticos | Nodos asociados |
| 2.9913 | 4205 4208 4207 4201 6114 4105 | 3.0033 | 4205 4208 4207 4201 6114 4105 | 2.3881 | 4208 4205 4207 4201 5301 4206 |
| 2.2277 | 5301 5303 5302 5205 5202 5104 | 2.0061 | 5301 5303 5205 5202 5302 5204 | 2.2315 | 5301 5303 5302 5205 5202 5104 |
| 1.8963 | 5301 5303 4208 5202 4205 5205 | 1.8561 | 5301 5303 4208 4205 5202 5205 | 1.8397 | 5301 5202 5205 5303 5204 5104 |

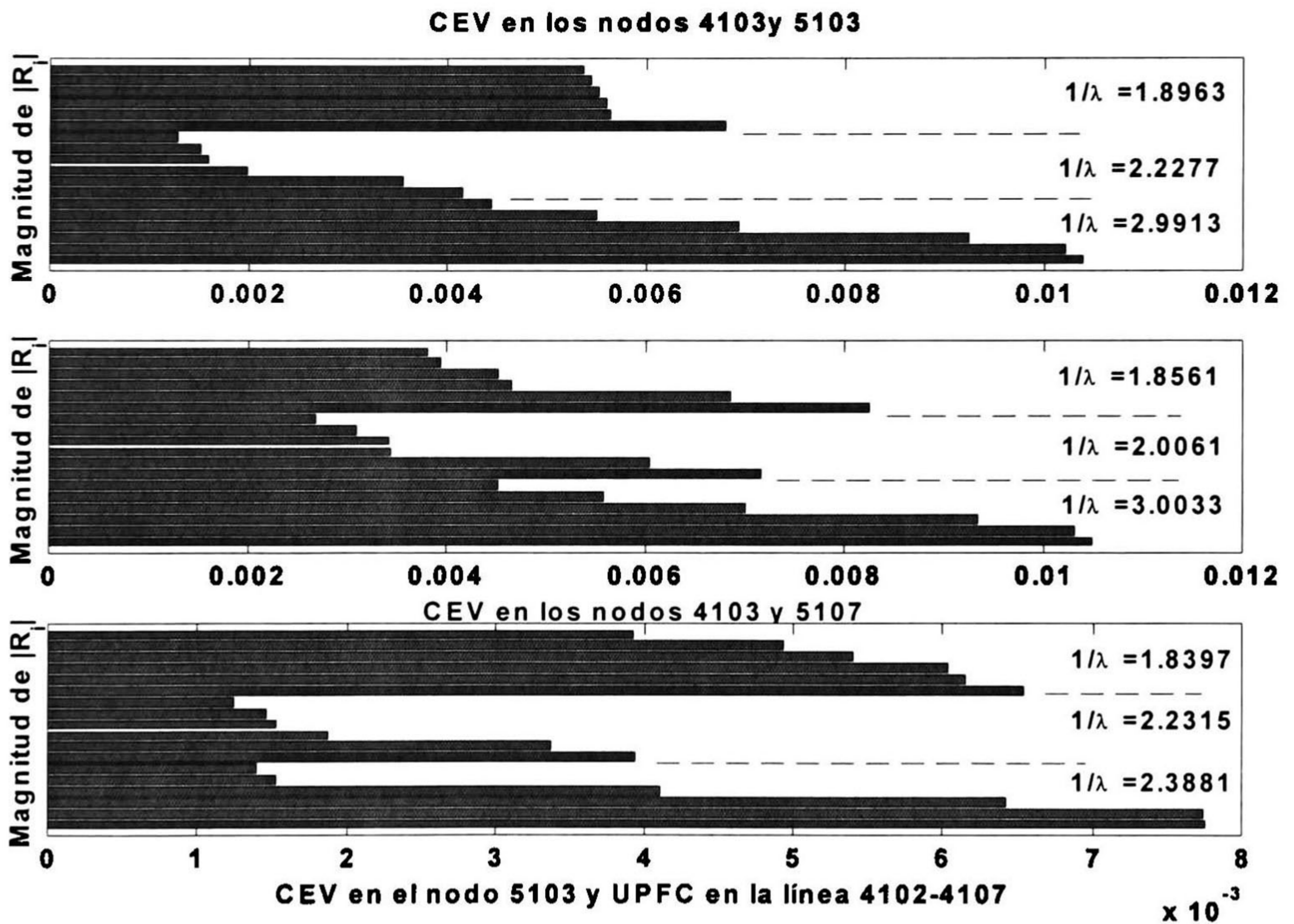


Figura 5.8.- Magnitud de los residuos asociados a las zonas críticas

5.3.2.2 Cálculo de márgenes de estabilidad

Una medida práctica del efecto de un dispositivo de control es el aumento en el margen de estabilidad. El margen de estabilidad se definió en el capítulo 2 como la

diferencia entre la potencia en la condición de máxima cargabilidad de prefalla y la potencia en la condición de máxima cargabilidad de postfalla.

Para analizar el aumento en los márgenes de estabilidad se seleccionaron las contingencias más severas de línea determinadas del análisis de sensibilidades en la sección 5.3.3.2. En la Tabla 5.16 se resumen los resultados obtenidos.

Tabla 5.16
Impacto de dispositivos FACTS en la estabilidad de los modos críticos para el CCO

| Salida de la línea | Alternativa de control | Condición resultante | Valor singular crítico |
|--------------------|---------------------------------|----------------------|--|
| 4102-4107 | Ninguna | Inestable | |
| | CEV en 4103 | Inestable | |
| | UPFC en 4102-4104 | Estable | $\sigma_1 = 0.1549$ $\sigma_2 = 0.2448$ |
| | CEV en 5106 & UPFC en 4102-4104 | Estable | $\sigma_1 = 0.1552$ $\sigma_2 = 0.2602$ |
| 1106-1109 | Ninguno | Inestable | - |
| | CEV en 4103 | Estable | $\sigma_1 = 0.0769$ $\sigma_2 = 0.2308$ |
| | UPFC en 4102-4107 | Estable | $\sigma_1 = 0.0786$ $\sigma_2 = 0.2500$ |
| | CEV en 5104 y UPFC en 4102-4107 | Estable | $\sigma_1 = 0.2442$ $\sigma_2 = 0.3654$ |
| 2104-3103 | Ninguno | Inestable | |
| | CEV en 4103 | Estable | $\sigma_1 = 0.2312$ $\sigma_2 = 0.3317$ |
| | UPFC en 4102-4107 | Estable | $\sigma_1 = 0.2370$ $\sigma_2 = 0.3725$ |
| | CEV en 5104 & UPFC en 4102-4107 | Estable | $\sigma_1 = 0.2536$ $\sigma_2 = 0.3293$ |

Los resultados obtenidos muestran que la instalación de elementos de control en nodos vulnerables del sistema permite aumentar en forma importante los márgenes de estabilidad, aún para las contingencias más severas. A continuación se cuantifica el impacto de un dispositivo en términos del aumento en MVAr y MW en la potencia de carga.

5.3.5 Curvas Q-V

En esta sección se comparan los resultados obtenidos mediante el análisis modal y de valores singulares con el análisis de curvas Q-V. El procedimiento adoptado de análisis se describe en [60]. Las curvas P-V para los nodos con mayor participación en el modo crítico se muestran en las Figuras 5.9 y 5.10. El análisis confirma que la condición de máxima cargabilidad se obtiene para un nivel de potencia de 711 MW, esto es, para un incremento de carga del 1% respecto del caso base, como se estimó del análisis de valores singulares;

la magnitud de los voltajes en el caso de máxima cargabilidad del nodo 4103 (0.80 p.u.) revela el grado de estrés en la operación del sistema.

Por otra parte, el análisis de las curvas Q-V en la Figura 5.10, muestra que el margen de estabilidad en MVAR, para los nodos más débiles, es muy reducido en el orden de 3 y 4 MVAR para los nodos 4103 y 4104 y alrededor de 4 MVAR para los buses 4105 y 4109 respectivamente. Nótese que, en algunos casos, se obtiene el máximo punto de cargabilidad en los estudios de flujos de potencia.

Finalmente en las Figura 5.11 y 5.12 se muestra el efecto de las alternativas de control en la respuesta PV y Q-V del bus 4103. Obsérvese que la instalación de un CUFPP en la zona de 230 kV no mejora el margen de estabilidad del modo crítico en coordenadas reales: su efecto solo puede analizarse mediante el análisis modal.

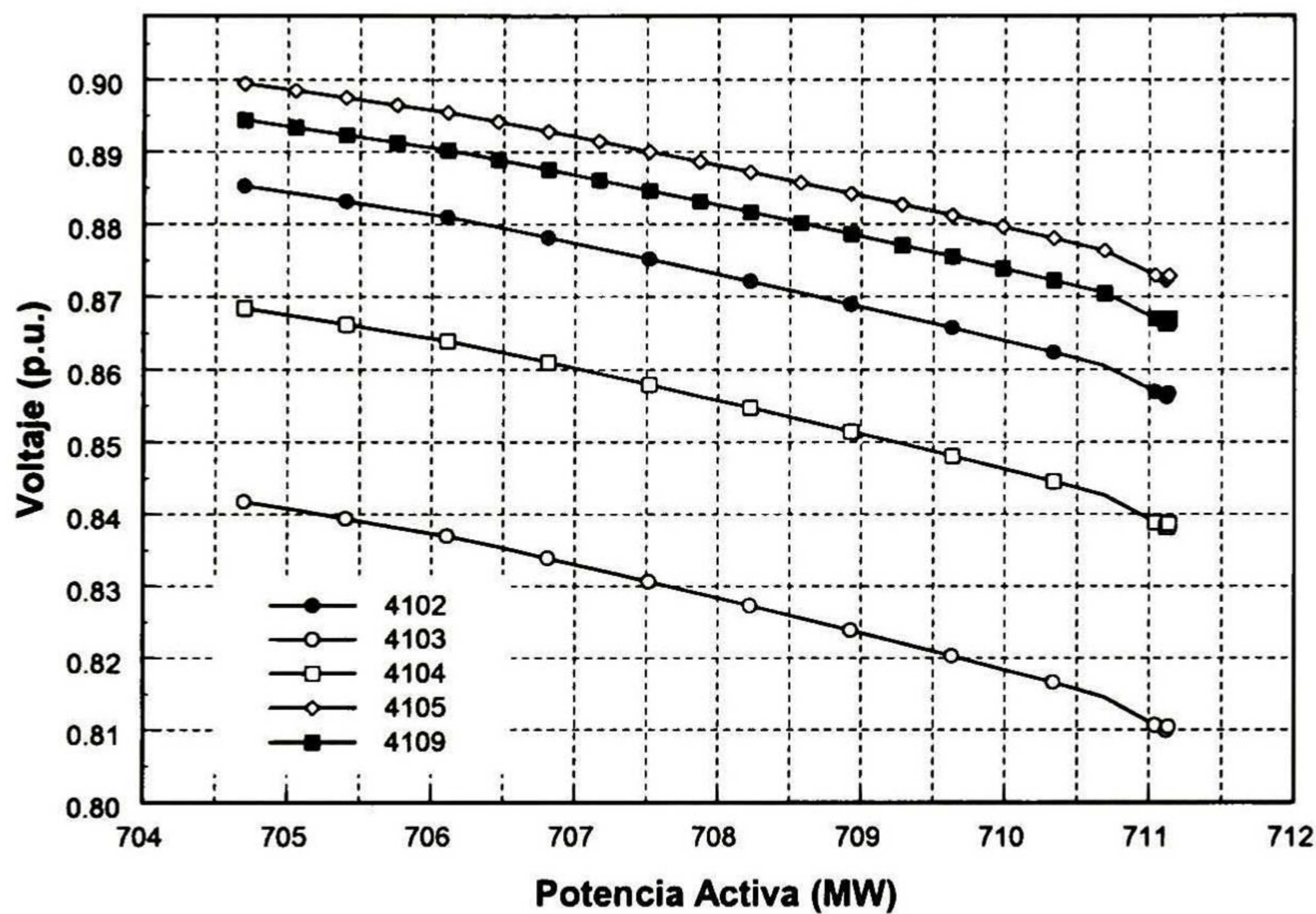


Figura 5.9.- Curvas P-V para los nodos con mayor participación en el modo crítico

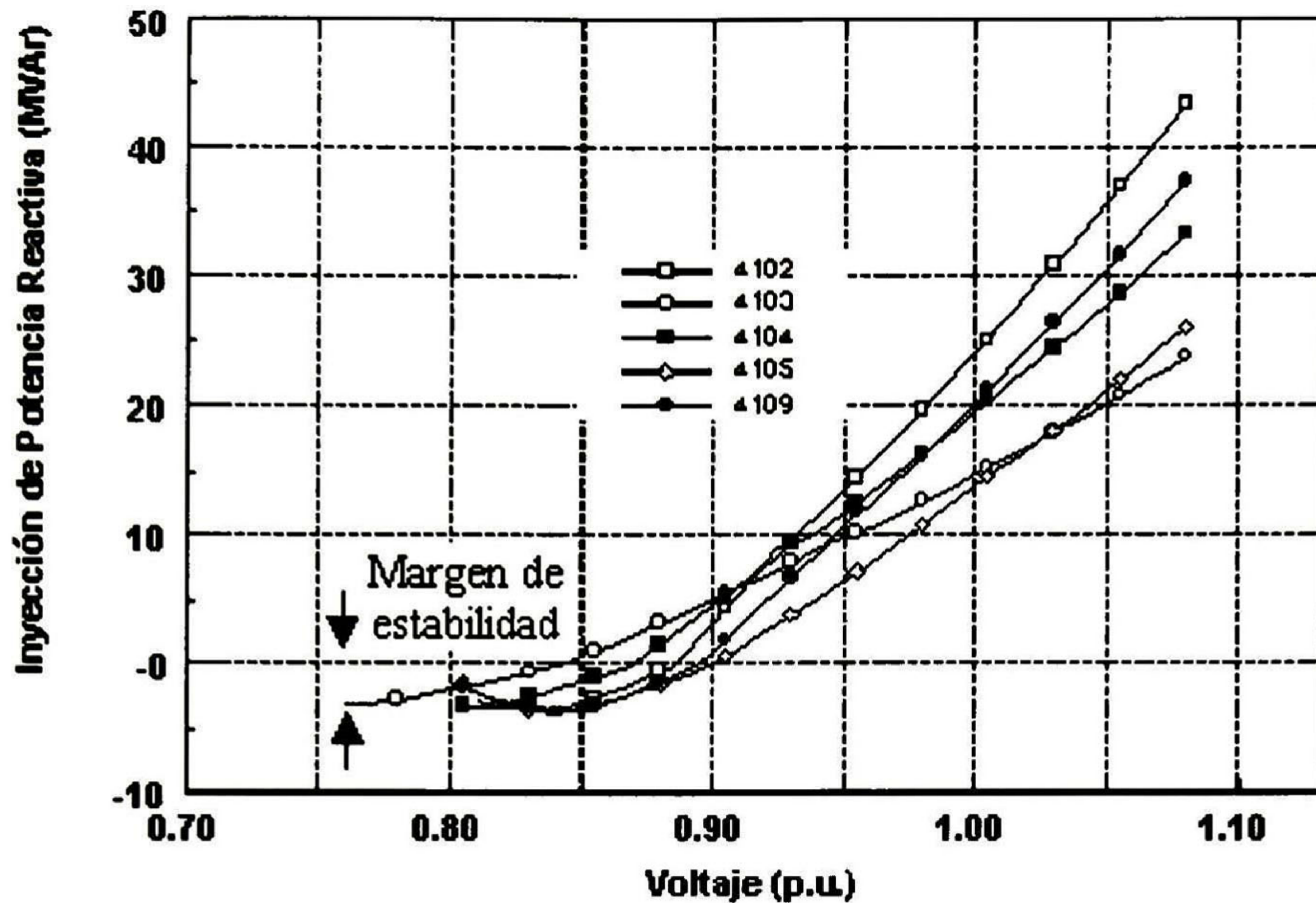


Figura 5.10.- Curvas V-Q para los nodos con mayor participación en el modo crítico

Por otra parte, en la figura 5.12 se muestra el efecto de la salida de la línea 1106-1109 en la red de 230 kV en el margen de estabilidad del bus 4103 considerando la instalación de un CEV y un CUFP. Se puede apreciar que la instalación de dispositivos de control mejora en forma significativa el margen de estabilidad. El análisis muestra también que un CEV permite un mejor control de los niveles de tensión mientras que el CUFP permite una mayor margen de transferencia de potencia. Para el caso en estudio, el aumento en la cargabilidad del sistema es del orden de 25 MVAR para el caso del CEV y 45 MVAR para el caso de un CUFP.

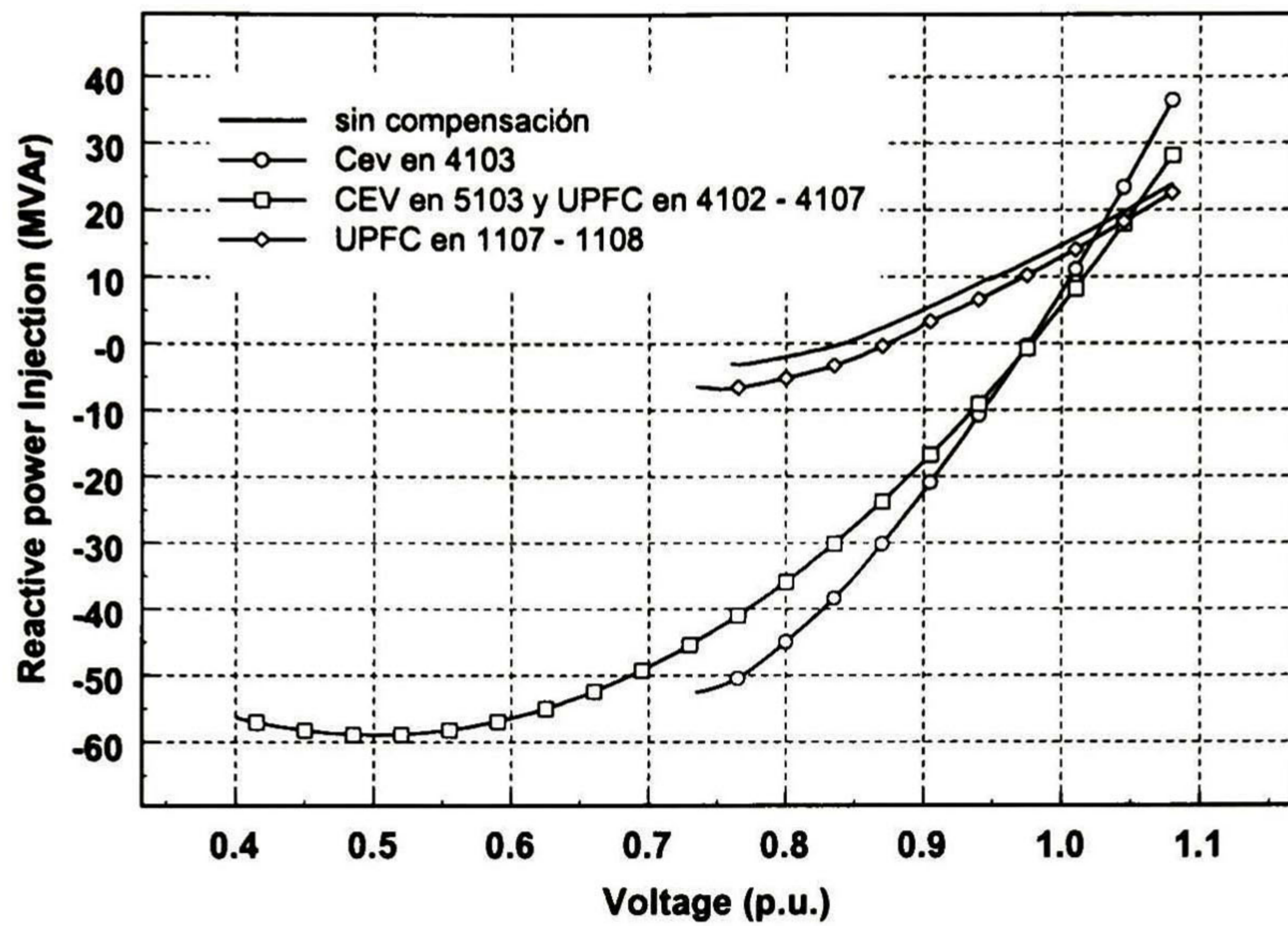


Figura 5.11.- Curvas V-Q para el bus 4103 mostrando el aumento en el margen de estabilidad

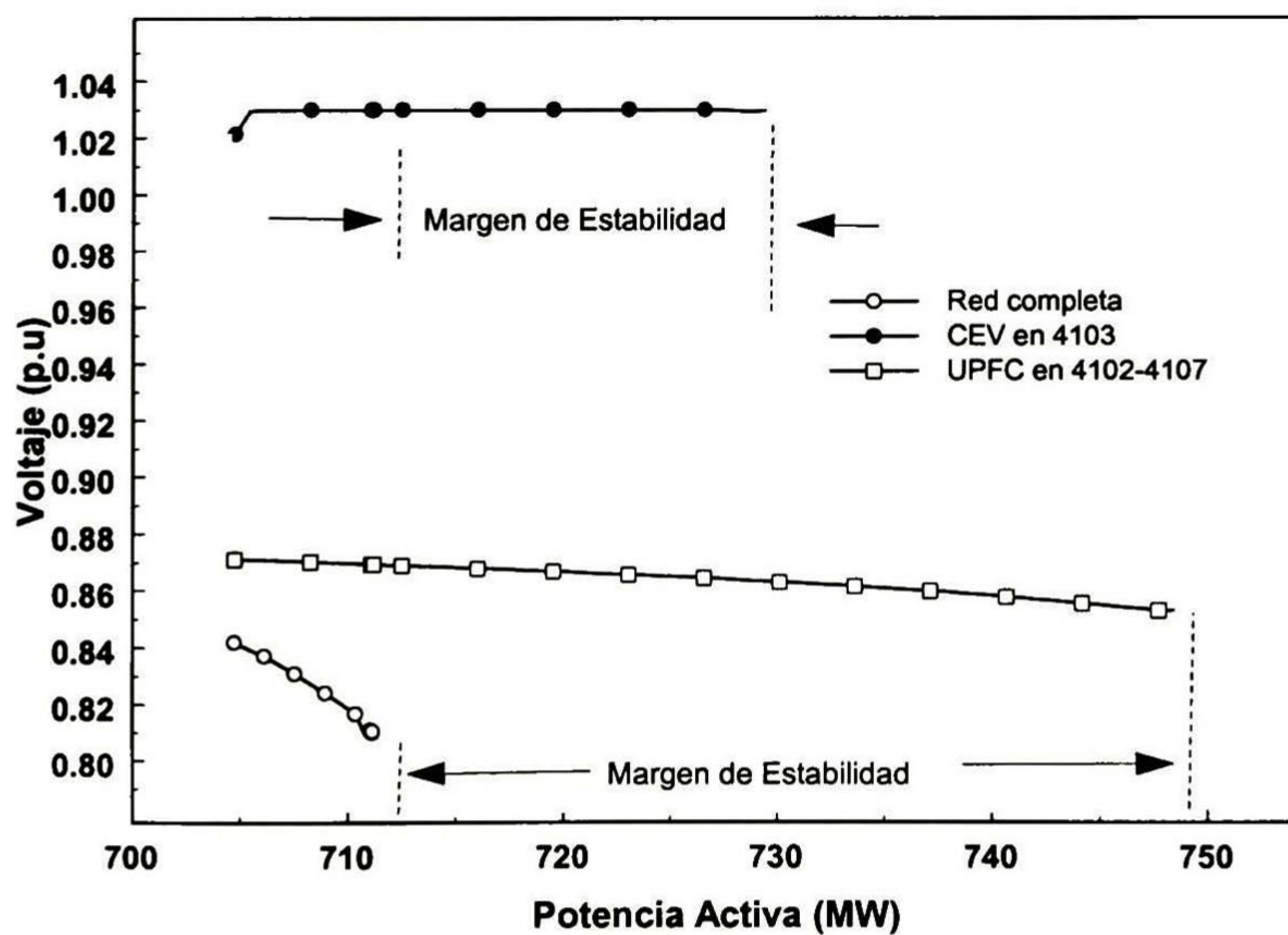


Figura 5.12.- Curvas P-V para el nodo 4103 ante la salida de una línea

CONCLUSIONES, APORTACIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

6.1 CONCLUSIONES GENERALES

El estudio de la estabilidad de voltaje en un SEP, tradicionalmente se ha hecho siguiendo dos vertientes [1]:

- Considerando que el fenómeno es lento y de característica lineal
- Considerando que el fenómeno es definitivamente no lineal

El análisis lineal en estado estable presenta características útiles de ser aprovechadas, como la rapidez computacional, la simplicidad de la formulación matemática del problema y la posibilidad de determinar a nivel sistema las diferentes interacciones de los elementos que conforman la red en el fenómeno de estabilidad (inestabilidad) de voltaje.

En esta tesis se ha presentado el desarrollo de una metodología de uso práctico, para el análisis de la estabilidad de voltaje en estado estable de un sistema de características reales, en la cual se incorporan técnicas de análisis singular y modal para la identificación de los mecanismos que causan la inestabilidad y para el desarrollo de medidas correctivas basadas en el uso de dispositivos FACTS.

El desarrollo y la implementación de esta metodología ha permitido reconocer las ventajas y limitaciones del mismo, ventajas tales como, la rapidez computacional, la capacidad de determinar las interacciones de los elementos que conforman el sistema en el fenómeno de la inestabilidad de voltaje permitiendo así la capacidad de una mejor interpretación física del fenómeno, así como la derivación del modelo en espacio de estados y permitir la capacidad de determinar el impacto de cualquier tipo de dispositivo de compensación en la estabilidad del sistema, abriendo así la posibilidad de obtener un modelo generalizado de compensación.

Los principales problemas que se identificaron en el transcurso del desarrollo de este trabajo fueron: Ya que el problema está relacionado intrínsecamente con aspectos no lineales que se incrementan con el grado de estrés en el sistema, el modelado lineal de los elementos aunado al modelado no adecuado de la carga puede en muchos casos conducir a la obtención de resultados optimistas, es decir ocultar modos críticos de voltaje, o desplazar las zonas débiles del sistema, así como la incorrecta magnitud de la

participación de los elementos del sistema en el mecanismo de inestabilidad. La determinación del límite de cargabilidad o punto crítico de operación se hace de forma secuencial mediante el aumento proporcional de la carga del sistema por lo que en la vecindad del punto crítico se hace necesario el disminuir este incremento sobre la base de un criterio empírico para permitir la convergencia del estudio de flujos. La estabilidad esta relacionada directamente con unos pocos modos críticos, los cuales son poco localizados lo que dificulta la interpretación de la importancia de la participación de los diferentes elementos del sistema en el fenómeno.

Finalmente el análisis modal presenta resultados aunque optimistas respecto a otras técnicas de análisis, si satisfactorios que permiten una mejor comprensión de la naturaleza del fenómeno. Estos resultados pueden muy bien complementarse con estudios detallados de la respuesta del sistema.

6.2 APORTACIONES

El autor considera que las contribuciones más importantes de este trabajo son:

- El desarrollo de un modelo generalizado del sistema de potencia, capaz de incluir los efectos de los diferentes elementos que lo componen, así como la representación de sus límites de operación, y que puede modificarse con diversos dispositivos de control y de compensación para el alivio de la inestabilidad de voltaje.
- El desarrollo de una metodología de uso práctico que permite el análisis de la estabilidad de voltaje en estado estacionario en un sistema eléctrico de potencia, así como la identificación de los mecanismos que conducen a la inestabilidad.
- La implementación de la metodología propuesta en un programa de simulación digital que permite identificar los problemas que conducen a la inestabilidad de voltaje en un sistema eléctrico de características reales, y el desarrollo de medidas correctivas basadas en el análisis singular y modal de las ecuaciones modificadas de flujos de potencia.
- La evaluación de las diferentes opciones de compensación, mediante la aplicación de un criterio basado en el impacto sobre la estabilidad, así como en el mejoramiento de los márgenes de transferencia de potencia.
- La comparación de los resultados obtenidos mediante la metodología propuesta, con otros reportados en la literatura que hacen uso de otras técnicas de estudio.

6.3 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

En opinión del autor los siguientes aspectos requieren de una mayor profundidad en su investigación:

- La determinación exacta del punto de colapso de voltaje, mediante la aplicación combinada del análisis modal y métodos de continuación.
- El desarrollo de mejores modelos de dispositivos de compensación, FACTS, capaces de incluir efectos no lineales, tales como términos de segundo orden.

- El desarrollo de esta metodología en estudios dinámicos y la capacidad de su inclusión en estudios en tiempo real.
- El desarrollo mas detallado del modelo equivalente en espacio de estados para lograr que el parámetro a comparar del dispositivo compensador pueda ser generalizado, para así poder determinar un mayor numero de funciones de transferencia, así como la determinación de índices de controlabilidad y observabilidad de estos dispositivos, que coadyuven a la mejor localización y la posibilidad de la diversidad de su forma de operación.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] "A Review of Definitions and Classification of Stability Problems in Today's Power Systems", Panel Session on Stability Terms and Definitions, IEEE/PES Winter Meeting, Feb. 2-6, 1997, New York.
- [2] Carson W. Taylor, *Power System Voltage Stability*, EPRI McGraw-Hill, 1994
- [3] "Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools and Industry Experience", IEEE Special Publication 90TH0358-2-PWR.
- [4] *Voltage Stability Assessment, Procedures and Guides*, IEEE/PES Special Publication, Draft, April 1999, <http://www.power.uwaterloo.ca>.
- [5] M. Stubbe, A. Bihain, J. Deuse, "Simulation of Voltage Collapse", *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 15, Number 4, 1993, pp. 239-243.
- [6] O. O. Obadina, G. J. Berg, "Identifying Electrically Weak and Strong Segments of a Power Systems from a Voltage Stability Viewpoint", *IEE Proceedings*, Vol. 137, Pt C, No. 3, May 1990, pp. 205-212.
- [7] Carson W. Taylor, "Voltage Stability Analysis and Visualization", Document prepared for NERC Interconnection Dynamics Task Force, September 1990, pp. 1-5.
- [8] W. R. Lachs, "Different types of voltage stability", IEEE/PES 1993 Summer Meeting, Vancouver, July 18-22, 1993.
- [9] "Criteria and Methodologies Established in the Ambit of GTAD/SCEL/GCOI Voltage Collapse Task Force for Studies on Voltage Stability in the Brazilian north/northeast, south/southeast and north/south interconnected systems", 2000 IEEE PES/Summer Meeting, 16-20 July, 2000. Seattle, WA.
- [10] Per-Anders Löf, David J Hill, Stefan Arnborg and Goran Andersson, "On the Stability of Long-Term Voltage Stability", *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 15, Number 4, 1993, pp. 229-237.
- [11] M. K. Pai, "Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, February, 1992, pp. 243-249.
- [12] *Dynamic Versus Static VAR Sources*, Final report prepared by: Reactive Power Reserve Work Group Technical Studies Subcommittee WSCC, November 1997.
- [13] V. A. Venikov and M. N. Rozonov, "The Stability of a load", *Izd. Akad. Nauk. SSSR (Energetica i Atrtomatca)*, No. 3, 1961.
- [14] V. A. Venikov, V. A. Stroeve, V. I. Idlechick, V. I. Tarasov, "Estimation of Electrical Power System Steady State Stability in Load Flow Calculations", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, No. 3, May/June 1975, pp. 1034-1041.
- [15] S. Abe, J. Makino, A. Isuno, U. Moroe, O. Nagasaki, "Criteria for Power System Voltage Stability by Steady State Analysis", paper presented at the IEEE PES Summer Meeting, San Francisco, CA. July 20-25, 1975.

- [16] P. Borremans, A. J. Calvaer, J. P. De Reuck, J. Gossens, E. Van Geert, J. Van Hecke and A. Van Ranst, "*Voltage Stability – Fundamental Aspects and Comparison of Practical Criteria*", CIGRE proceedings, 1984. Paper 38-11.
- [17] J. Carpenter, R. Girard, E. Scanc, "*Voltage Collapse Proximity Indicators Computed from an Optimal Flow*", Proceedings of the 8th PSCC, Helsinki, 1984.
- [18] P. Kessel, H. Glavitch, "*Estimating the Voltage Stability of a Power System*", IEEE Trans., Vol. PWRD-1, No. 3, pp. 346-354, July 1986.
- [19] N. Flatabø, R. Ognedal, T. Carlsen, "*Voltage Stability Condition in a Power System Calculated by Sensitivity Methods*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4, November 1990, 1286-1293.
- [20] I. Dobson, "*Observations on the Geometry of Saddle Node Bifurcation and Voltage Collapse in Electric Power Systems*", IEEE Transactions on Circuits and Systems, Part 1, 39(3): pp. 240-243, March 1992.
- [21] C. A. Cañizares, F. L. Alvarado, C. L. Demarco, I. Dobson and W. F. Long, "*Point of Collapse Methods Applied to AC/DC Power Systems*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 2, May 1992, pp. 673-683.
- [22] B. Gao, G.K. Morison, P. Kundur, "*Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis*", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 4, November, 1992, pp. 1529-1542.
- [23] Yakout Mansour, Wilsun Xu, Fernando Alvarado, Chhewang Rinzin, "*SVC Placement Using Critical Modes of Voltage Instability*", Power Industry Computer Application Conference 1993, Conference Proceedings pp. 131-137.
- [24] P. Kundur, B. Gao, G. K. Morison, "*Practical Application of Modal Analysis for Voltage Stability Margins*", IEEE/NTUA Athens Power Tech Conference, Sept. 5-8, 1993, Paper APT IS-373, pp. 222-227.
- [25] P. Kundur, B. Gao, "*Practical Considerations in Voltage Stability Assessment*", IV SEPOPE, Foz do Iguazu, May 23-27, 1994, pp. 167-173.
- [26] W. Xu, Y. Mansour, P. G. Harrington, "*Planning Methodologies for Voltage Stability Limited Power Systems*", Electrical Power & Energy Systems, Vol. 15, Number 4, 1993, pp. 221-228.
- [27] A. Tiranuchit, R.J. Thomas, "*A Posturing Strategy Against Voltage Instabilities in Electric Power Systems*", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 87-93, 1988.
- [28] Denis Lee Hau Aik, Goran Anderson, "*Use of Participation Factors in Modal Voltage Stability Analysis of Multi-Infeed HVDC Systems*", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, January 1998, pp. 203-211.
- [29] P. A. Löf, G. Anderson, D. J. Hill, "*Generator Modelling For Static Voltage Stability Studies*", Proceedings of the 11th Power Systems Computation Conference, Avignon France, pp. 923-929., Aug/Sep 1993.

- [30] P. A. Löf, T. Smed, G. Anderson, D. J. Hill, "*Fast Calculation of a Voltage stability Index*", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 3, July 1986, pp. 346-354.
- [31] A. Berizzi, A. Bignotti, P. Finazzi, D. Dosi, P. Marannino, "*An Automatic Procedure for Evaluating and Improving Operating Margins Against Voltage Collapse*", 12th Power Systems Computation Conference, Dresden, August 19-23, 1996, pp.644-650.
- [32] O. Ekwue, H. B. Wan, D. T. Y. Cheng, Y. H. Song, "*Singular Value Decomposition Method for Voltage Stability on the National Grid System (NGC)*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, S0 142-0615 (99), pp. 425-432.
- [33] M. A. Pérez, A.R. Messina, C. Fuerte-Esquivel, , "*Application of FACTS Devices to Improve Steady State Voltage Stability*", IEEE Power Summer Meeting, Seattle, WA. July 16-20, 2000, paper SM-25698.
- [34] T. Wang, L.C.P. da Silva, Wilsun Xu, "*Investigation of the Relationship Between Ill-conditioned Power Flow and Voltage Collapse*", IEEE Power Engineering Review, July 2000, pp. 43-45.
- [35] X. Vieira, N. Martins, A. Bianco, H.J.C.P. Pinto, M.V.F. Pereira, P. Gomes, M.G. dos Santos, "*Tools for Voltage Stability Analysis, Including a Probabilistic Approach*", IV SEPOPE, Foz do Iguacu, Brasil, 1994, pp. 304-322.
- [36] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Inc., 1994.
- [37] T. Van Cutsen, C. Vournas, *Voltage Stability in Electric Power Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [38] P. Lof, G. Andersson, D.J. Hill, "*Voltage Stability Indices for Stressed Power Systems*", IEEE/PES 1992 Winter Meeting, New York, Paper 92 WM 101-6 PWRs.
- [39] A. Calvaer, "Voltage Stability and Voltage Collapse", CIGRE, Paper 38.02, 1985.
- [40] Y.H. Song, H.B. Wan, A.T. Johns, "*Transfer Limit Calculations Based on Integrated Approach*", 12th Power Systems Computation Conference, Dresden, August 19-23, 1996, pp. 658-664.
- [41] M.K. Pai, "*Assessment Of Corrective Measures For Voltage Stability Considering Load Dynamics*", Electrical Power & Energy Systems, Vol. 17, No. 5, pp. 325-334, 1995.
- [42] Thomas Kailath, *Linear Systems*, 1980, Prentice Hall, Inc.
- [43] R. Jiménez B., "*Análisis de Estabilidad de Voltaje en Estado Estable Mediante Técnicas de Análisis Modal*", Tesis de Maestría en Ciencias, CINVESTAV IPN U. Guadalajara, Septiembre 1999.
- [44] A.E. Efthymiadis, Y.H. Guo, "*Generator reactive power limits and voltage stability*", Power Systems\ Control and Management Conf., April 16-18, IEE Conf. Publication, 421, 1996, pp. 196-199.
- [45] P.A. Lof, G. Andersson, D.J. Hill, "*Voltage dependent reactive power limits for voltage stability*", IEEE Trans. on PWRs, 10(1), pp. 220-228., Feb. 1995.
- [46] H. Seifi, K. Imhof, "*Voltage stability analysis in an energy management system*", 12th Power Systems Computation Conference, Dresden, August, 19-23, 1996, pp.988-994.

- [47] N. Martins, L. T. G. Lima, "*Determination of Suitable Locations for Power System Stabilizers and Static VAR Compensators for Damping Electromechanical Oscillations in Large Scale Power Systems*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-5, pp. 1455-1469, November 1990.
- [48] T. Smed, "*Feasible Eigenvalue Sensitivity for Large Power Systems*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, May 1993.
- [49] V. Ajjarapu and C. Christy, "*The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis*," IEE PICA Conference Proceedings, pp. 304-311, May 1991.
- [50] G. H. Golub, C.F. Van Loan, *Matrix computations*, North Oxford Academic, Oxford, 1983.
- [51] C. Paige "*Properties of numerical algorithms relating to computing controllability*," IEEE Trans. on Automatic Control, vol. AC-26, no. 1, 1981, pp. 130-138.
- [52] Alexandr Z. Gamm, Irina Golub, "*Determination of Locations for Facts and Energy Storage by the Singular Analysis*," ", Proceedings 1998 International Conference on Power System Technology, August 18-21, Beijing, 1998, pp. 411-414.
- [53] A. R. Messina, "*Aplicación de Compensadores Estáticos de VARs para Mejorar el Comportamiento Dinámico de los Sistemas de Potencia*," Notas de Curso, Instituto Tecnológico de Morelia, 21-25 Junio de 1993.
- [54] "*A study of static reactive power compensators for high-voltage power systems, Final Report*," Prepared by Westinghouse Electric Corporation, May 1981.
- [55] S. A. Nabavi-Niaki, "*Modelling and Applications of Unified Power Flow Controller (UPFC) For Power Systems*," Ph D. Thesis, 1996.
- [56] J.P. Paul, C. Corroyer, P. Jeanell, J.M. Tesson, F. Maury, A. Torra, "*Improvements in the organization of secondary voltage control in France*", CIGRE Paper 38/93, 1990.
- [57] A. Berizzi, P. Bresesti, P. Marannino, G. P. Granelli, M. Montagna, "*System –Area operating margin assessment and security enhancement against Voltage Collapse*" IEEE Transactions on Power Systems Vol 11, pp. 1451-1462, 1996.
- [58] D.K. Lindner, J. Babenreier, A.M.A. Hamdan, "*Measures of controllability and observability an residues*", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol 34, No. 6, June 1989, pp. 648-650.
- [59] B. Gao, G.K. Morison and. P. Kundur, "*Voltage Stability Analysis Using Static and Dynamic Approaches*," Paper 92SM590-0 PWRS, IEEE PES/Summer Meeting 1992, July 12-16, 1992, Seattle, Washington.
- [60] Carson W. Taylor, "*Voltage Stability Analysis and Visualization*", NERC Interconnection Dynamics Task Force, September 1990, pp. 1-5.

APENDICE A1

DATOS DEL SISTEMA DE PRUEBA DE TRES GENERADORES[2]

Tabla A1.1
Datos de los nodos del sistema de prueba

| Bus | Voltaje (p.u.) | Angulo (grados) | Potencia activa generada | Potencia Reactiva Generada | Potencia Activa de carga | Potencia Reactiva de carga | Conductancia (p.u.) | Susceptancia (p.u.) | Tipo de nodo |
|-----|----------------|-----------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|--------------|
| 1 | 0.9800 | 0 | 39.8100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Slack |
| 2 | 0.9646 | 0 | 17.3600 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 3 | 1.0400 | 0 | 11.5400 | 0 | 0 | 0.130 | 0 | 0 | PV |
| 4 | 1.0000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 5 | 1.0000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 5 | 1.0000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 6 | 1.0000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 7 | 1.0000 | 0 | 0 | 0 | (1), (2), (3) | (1), (2), (3) | 0 | 0 | PQ |
| 8 | 1.0000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 9 | 1.0000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 10 | 1.0000 | 0 | 0 | 0 | (1), (2), (3) | (1), (2), (3) | 0 | 0 | PQ |

Nota: Los datos de las potencia de carga y generación esta en p.u. sobre una base de 100 MVA

Carga para las distintas condiciones de operación:

Tabla A1.2
Diferentes condiciones de operación del sistema de prueba

| Condición | Potencia Activa de carga | Potencia Reactiva de carga | Cambiador en derivación del transformador del enlace 9 - 10 |
|-----------|--------------------------|----------------------------|---|
| 1 | 33.8400 | 9.7100 | 0.9750 |
| 2 | 34.3500 | 9.8500 | 0.9938 |
| 3 | 34.6000 | 9.9300 | 1.0000 |

Tabla A1.3
Datos de las ramas del sistema de prueba

| Linea | | Resistencia (p.u.) | Reactancia (p.u.) | Susceptancia (total p.u.) | Cambiador en derivación |
|-------|------|--------------------|-------------------|---------------------------|-------------------------|
| Nodo | Nodo | | | | |
| 1 | 4 | 0.0000 | 0.0020 | 0.0000 | 0.8857 |
| 2 | 5 | 0.0000 | 0.0045 | 0.0000 | 0.8857 |
| 3 | 6 | 0.0000 | 0.0125 | 0.0000 | 0.9024 |
| 4 | 5 | 0.0000 | 0.0040 | 0.0000 | 0.0000 |
| 5 | 6 | 0.0015 | 0.0288 | 1.1730 | 0.0000 |
| 5 | 6 | 0.0015 | 0.0288 | 1.1730 | 0.0000 |
| 5 | 6 | 0.0015 | 0.0288 | 1.1730 | 0.0000 |
| 5 | 6 | 0.0015 | 0.0288 | 1.1730 | 0.0000 |
| 5 | 6 | 0.0015 | 0.0288 | 1.1730 | 0.0000 |
| 6 | 7 | 0.0000 | 0.0030 | 0.0000 | 1.0664 |
| 6 | 8 | 0.0000 | 0.0026 | 0.0000 | 1.0800 |
| 8 | 9 | 0.0010 | 0.0030 | 0.0000 | 0.0000 |
| 9 | 10 | 0.0000 | 0.0010 | 0.0000 | (1), (2), (3) |

APENDICE A2

DATOS DEL SISTEMA INTERCONECTADO DE GUATEMALA, CONDICIONES DE DEMANDA MÁXIMA 1998

Tabla A2.1
Datos de los nodos del SIG

| Bus | Voltaje (p.u.) | Angulo (grados) | Potencia activa generada | Potencia Reactiva Generada | Potencia Activa de carga | Potencia Reactiva de carga | Conductancia (p.u.) | Susceptancia (p.u.) | Tipo de nodo |
|------|----------------|-----------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|--------------|
| 1101 | 0.97037 | -6.7531 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 1102 | 0.96243 | -7.2911 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 1103 | 0.94737 | -8.9095 | 0 | 0 | 0 | 0.130 | 0 | 0 | PQ |
| 1104 | 1.00951 | -4.1609 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 1105 | 0.98606 | -4.2463 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 1106 | 0.96172 | -7.3685 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 1107 | 0.94845 | -8.9201 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 1108 | 0.94794 | -9.0678 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 1109 | 0.94741 | -8.7554 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 1110 | 0.91921 | -10.5955 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 1111 | 0.96359 | -7.2092 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 1112 | 0.96310 | -7.2320 | 0 | 0 | 0.20 | 0.10 | 0 | 0 | PQ |
| 1113 | 0.99938 | -7.4280 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 1114 | 0.97350 | -10.8194 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 1115 | 0.99305 | -8.3750 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 2101 | 1.02217 | -9.1960 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 2102 | 1.01604 | -14.7055 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 2103 | 1.02202 | -14.1532 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 2104 | 1.02946 | -13.2769 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 3101 | 0.98689 | -15.1186 | 0 | 0 | 0.325 | 0.130 | 0 | 0 | PQ |
| 3102 | 0.99517 | -14.5270 | 0 | 0 | 0.069 | 0.020 | 0 | 0 | PQ |
| 3103 | 1.00947 | -14.4476 | 0 | 0 | 0.225 | 0.076 | 0 | 0 | PQ |
| 3104 | 1.00845 | -10.5584 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 3105 | 0.99263 | -14.3319 | 0 | 0 | 0.099 | 0.035 | 0 | 0 | PQ |
| 3106 | 0.99216 | -13.9041 | 0 | 0 | 0.020 | 0.010 | 0 | 0 | PQ |
| 3107 | 1.04518 | -3.2560 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 3108 | 1.00052 | -14.9889 | 0 | 0 | 0.149 | 0.035 | 0 | 0 | PQ |
| 3109 | 0.98734 | -13.0237 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 3110 | 1.0030 | -9.8194 | 0 | 0 | 0.095 | 0.048 | 0 | 0 | PQ |
| 3111 | 1.00057 | -11.4015 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 3112 | 1.00494 | -10.8706 | 0 | 0 | 0.161 | 0.038 | 0 | 0 | PQ |
| 3113 | 0.98621 | -6.7678 | 0 | 0 | 0.330 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 3201 | 0.95175 | -15.1474 | 0 | 0 | 0.200 | 0.60 | 0 | 0 | PQ |
| 3202 | 0.99285 | -15.5006 | 0 | 0 | 0.325 | 0.110 | 0 | 0 | PQ |
| 3203 | 0.99791 | -15.1558 | 0 | 0 | 0.222 | 0.080 | 0 | 0 | PQ |
| 3204 | 1.00015 | -15.5442 | 0 | 0 | 0.265 | 0.053 | 0 | 0 | PQ |
| 3205 | 0.99628 | -14.5398 | 0 | 0 | 0.187 | 0.116 | 0 | 0 | PQ |
| 3206 | 0.95912 | -18.4049 | 0 | 0 | 0.366 | 0.110 | 0 | 0 | PQ |
| 3207 | 0.95903 | -18.4033 | 0 | 0 | 0.366 | 0.111 | 0 | 0 | PQ |
| 3208 | 0.98457 | -16.5208 | 0 | 0 | 0.393 | 0.136 | 0 | 0 | PQ |
| 3209 | 0.98538 | -16.3087 | 0 | 0 | 0.360 | 0.145 | 0 | 0 | PQ |
| 3210 | 0.99175 | -16.1366 | 0 | 0 | 0.483 | 0.135 | 0 | 0 | PQ |

| | | | | | | | | | |
|------|---------|----------|-------|-------|-------|-------|---|---|-------|
| 3211 | 1.00277 | -9.3732 | 0 | 0 | 0.040 | 0.016 | 0 | 0 | PQ |
| 3212 | 1.03175 | -5.4352 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 3213 | 1.00017 | -9.6617 | 0 | 0 | 0.030 | 0.010 | 0 | 0 | PQ |
| 3214 | 1.02081 | -9.2702 | 0 | 0 | 0.022 | 0.008 | 0 | 0 | PQ |
| 3215 | 0.99578 | -15.2637 | 0 | 0 | 0.064 | 0.020 | 0 | 0 | PQ |
| 3216 | 0.95185 | -15.1506 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 4101 | 0.96954 | -18.0724 | 0 | 0 | 0.220 | 0.057 | 0 | 0 | PQ |
| 4102 | 0.88606 | -24.8255 | 0 | 0 | 0.334 | 0.140 | 0 | 0 | PQ |
| 4103 | 0.84260 | -31.2572 | 0 | 0 | 0.141 | 0.015 | 0 | 0 | PQ |
| 4104 | 0.86927 | -27.0792 | 0 | 0 | 0.022 | 0.006 | 0 | 0 | PQ |
| 4105 | 0.90014 | -24.4285 | 0 | 0 | 0.055 | 0.012 | 0 | 0 | PQ |
| 4106 | 1.01050 | -14.6496 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 4107 | 0.94449 | -19.7442 | 0 | 0 | 0.015 | 0.002 | 0 | 0 | PQ |
| 4108 | 0.90698 | -23.5789 | 0 | 0 | 0.072 | 0.020 | 0 | 0 | PQ |
| 4109 | 0.89512 | -24.3722 | 0 | 0 | 0.020 | 0.007 | 0 | 0 | PQ |
| 4201 | 0.98233 | -17.6457 | 0 | 0 | 0.057 | 0.016 | 0 | 0 | PQ |
| 4202 | 1.00033 | -10.1456 | 0 | 0 | 0.041 | 0.020 | 0 | 0 | PQ |
| 4203 | 1.01356 | -14.8868 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 4204 | 1.00373 | -10.9412 | 0 | 0 | 0.070 | 0.013 | 0 | 0 | PQ |
| 4205 | 0.94455 | -19.5558 | 0 | 0 | 0.040 | 0.013 | 0 | 0 | PQ |
| 4206 | 0.99152 | -14.6963 | 0 | 0 | 0.143 | 0.058 | 0 | 0 | PQ |
| 4207 | 0.95318 | -19.0388 | 0 | 0 | 0.054 | 0.018 | 0 | 0 | PQ |
| 4208 | 0.94859 | -19.4250 | 0 | 0 | 0.005 | 0.001 | 0 | 0 | PQ |
| 4209 | 1.02292 | -6.3104 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 4210 | 1.00654 | -15.1855 | 0 | 0 | 0.110 | 0.052 | 0 | 0 | PQ |
| 5101 | 0.94743 | -21.3291 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 5102 | 0.95756 | -21.3822 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 5103 | 0.97419 | -18.7165 | 0 | 0 | 0.060 | 0.010 | 0 | 0 | PQ |
| 5104 | 0.92592 | -23.3543 | 0 | 0 | 0.120 | 0.042 | 0 | 0 | PQ |
| 5105 | 0.93987 | -23.6267 | 0 | 0 | 0.072 | 0.020 | 0 | 0 | PQ |
| 5106 | 0.96687 | -20.3511 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 5107 | 0.96524 | -19.6610 | 0 | 0 | 0.093 | 0.015 | 0 | 0 | PQ |
| 5201 | 0.96704 | -14.8926 | 0 | 0 | 0.070 | 0.030 | 0 | 0 | PQ |
| 5202 | 0.91820 | -22.5869 | 0 | 0 | 0.023 | 0.008 | 0 | 0 | PQ |
| 5203 | 1.00405 | -16.2599 | 0 | 0 | 0.073 | 0.030 | 0 | 0 | PQ |
| 5204 | 0.93462 | -20.1444 | 0 | 0 | 0.111 | 0.015 | 0 | 0 | PQ |
| 5205 | 0.91068 | -23.8863 | 0 | 0 | 0.101 | 0.030 | 0 | 0 | PQ |
| 5301 | 0.92102 | -24.5895 | 0 | 0 | 0.050 | 0.013 | 0 | 0 | PQ |
| 5302 | 0.94748 | -21.5869 | 0 | 0 | 0.030 | 0.010 | 0 | 0 | PQ |
| 5303 | 0.92931 | -23.6583 | 0 | 0 | 0.029 | 0.009 | 0 | 0 | PQ |
| 6101 | 1.04200 | 0 | 0.410 | 0.197 | 0 | 0 | 0 | 0 | slack |
| 6102 | 1.04200 | -0.1029 | 0.400 | 0.196 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6103 | 1.04200 | -0.1029 | 0.400 | 0.196 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6104 | 1.04200 | -0.1029 | 0.400 | 0.196 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6105 | 1.04200 | -0.1029 | 0.400 | 0.196 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6106 | 1.01591 | -2.3521 | 0.200 | 0.130 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6107 | 1.01591 | -2.3521 | 0.200 | 0.130 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6108 | 1.01591 | -2.3521 | 0.200 | 0.130 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6109 | 1.01305 | -3.9578 | 0.200 | 0.060 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6110 | 1.01305 | -3.9578 | 0.200 | 0.060 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6111 | 1.01305 | -3.9578 | 0.200 | 0.060 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6112 | 1.02000 | -13.7005 | .070 | .026 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6113 | 0.95841 | -15.7495 | 0.100 | 0.030 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6114 | 0.96287 | -17.4188 | 0.050 | 0.025 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |

| | | | | | | | | | |
|------|---------|----------|-------|--------|---|---|---|---|----|
| 6115 | 1.00768 | -10.3602 | 0.010 | 0.004 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6116 | 0.9643 | -16.5006 | 0.020 | 0.007 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6118 | 1.0045 | 2.6628 | 0.100 | 0.029 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6120 | 1.00678 | -3.1356 | 0.220 | 0.030 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6121 | 1.04500 | 2.6639 | 0.290 | 0.028 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6122 | 1.04500 | 2.6622 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PQ |
| 6124 | 0.94996 | -22.3688 | 0.014 | 0.007 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6127 | 0.99639 | -11.6894 | 0.095 | 0.010 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6128 | 1.00905 | -12.1691 | 0.175 | 0.080 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6131 | 1.01006 | 0.7303 | 0.540 | 0.175 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6132 | 1.01006 | 0.7303 | 0.540 | 0.175 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6133 | 1.03307 | -1.7628 | 0.391 | 0.230 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6134 | 1.01195 | 0.3674 | 0.400 | 0.180 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6135 | 1.01195 | 0.3674 | 0.400 | 0.180 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6201 | 1.02111 | -7.3109 | 0.100 | 0.025 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6202 | 1.04000 | 0.8397 | 0.244 | -0.008 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6203 | 1.01195 | -6.5725 | 0.085 | 0.018 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6204 | 1.03326 | -2.6690 | 0.147 | 0.008 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6205 | 1.02391 | -4.7478 | 0.102 | 0.005 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |
| 6207 | 1.02000 | -11.1289 | 0.049 | 0.030 | 0 | 0 | 0 | 0 | PV |

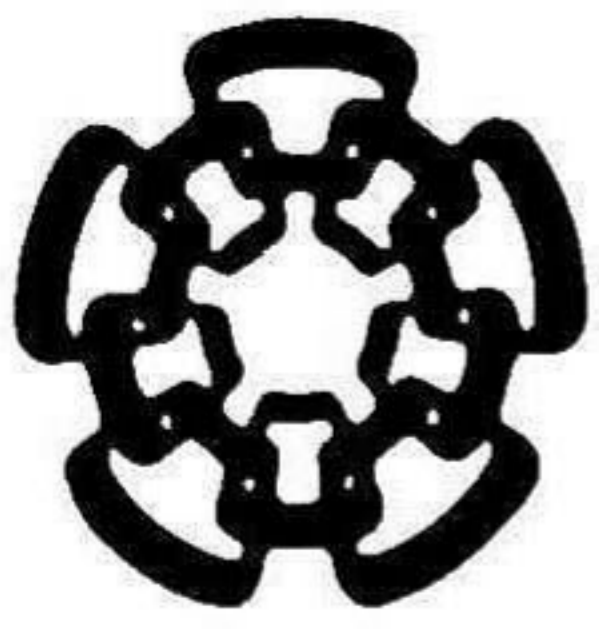
Nota: Los datos de las potencia de carga y generación esta en p.u. sobre una base de 100 MVA

Tabla A2.2
Datos de las ramas del SIG

| Linea | | Resistencia (p.u.) | Reactancia (p.u.) | Susceptancia (total p.u.) | Cambiador en derivación |
|-------|------|-----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------|
| Nodo | Nodo | | | | |
| 1101 | 1102 | 0.0031 | 0.01647 | 0.06128 | 0 |
| 6106 | 1101 | 0.0000 | 0.37823 | 0.0000 | 1.0000 |
| 6107 | 1101 | 0.0000 | 0.37823 | 0.0000 | 1.0000 |
| 6108 | 1101 | 0.0000 | 0.37823 | 0.0000 | 1.0000 |
| 1102 | 1106 | 0.0000 | 0.00052 | 0.00096 | 0.0000 |
| 1102 | 1111 | 0.0004 | 0.00135 | 0.00318 | 0.0000 |
| 1102 | 1112 | 0.0004 | 0.00135 | 0.00318 | 0.0000 |
| 1103 | 1107 | 0.0129 | 0.07886 | 0.26088 | 0.0000 |
| 1104 | 1108 | 0.0158 | 0.09012 | 0.29024 | 0.0000 |
| 1104 | 1108 | 0.0158 | 0.09012 | 0.29024 | 0.0000 |
| 6101 | 1104 | 0.0000 | 0.18610 | 0.0000 | 1.0000 |
| 6102 | 1104 | 0.0000 | 0.18610 | 0.0000 | 1.0000 |
| 6103 | 1104 | 0.0000 | 0.18610 | 0.0000 | 1.0000 |
| 6104 | 1104 | 0.0000 | 0.18610 | 0.0000 | 1.0000 |
| 6105 | 1104 | 0.0000 | 0.18610 | 0.0000 | 1.0000 |
| 1105 | 1111 | 0.0083 | 0.04780 | 0.11020 | 0.0000 |
| 6131 | 1105 | 0.0000 | 0.16000 | 0.00000 | 1.0000 |
| 6132 | 1105 | 0.0000 | 0.16000 | 0.00000 | 1.0000 |
| 1106 | 1109 | 0.0057 | 0.03159 | 0.10546 | 0.0000 |
| 1106 | 1109 | 0.0057 | 0.03159 | 0.10546 | 0.0000 |
| 1106 | 1110 | 0.0125 | 0.07810 | 0.25140 | 0.0000 |
| 1106 | 1113 | 0.0000 | 0.08640 | 0.00000 | 0.9550 |
| 1106 | 2101 | 0.0000 | 0.12000 | 0.00000 | 0.9250 |
| 1107 | 1108 | 0.0019 | 0.01079 | 0.03602 | 0.0000 |
| 1107 | 1109 | 0.0019 | 0.01079 | 0.03602 | 1.0000 |

| | | | | | |
|------|------|--------|---------|---------|--------|
| 1108 | 1109 | 0.0039 | 0.02158 | 0.07202 | 1.0000 |
| 1108 | 2102 | 0.0000 | 0.08400 | 0.00000 | 0.8950 |
| 1108 | 2103 | 0.0000 | 0.08400 | 0.00000 | 0.8950 |
| 1109 | 2104 | 0.0000 | 0.08330 | 0.00000 | 0.8650 |
| 1110 | 4203 | 0.0000 | 0.11571 | 0.00000 | 0.8650 |
| 1111 | 3113 | 0.0000 | 0.12000 | 0.00000 | 1.0000 |
| 6134 | 1112 | 0.0000 | 0.32222 | 0.00000 | 1.0000 |
| 6135 | 1112 | 0.0000 | 0.32222 | 0.00000 | 1.0000 |
| 1113 | 1115 | 0.0099 | 0.03593 | 0.00900 | 0.0000 |
| 1113 | 2101 | 0.0000 | 0.21420 | 0.00000 | 0.9700 |
| 6120 | 1113 | 0.0000 | 0.34230 | 0.00000 | 1.0000 |
| 6122 | 1113 | 0.0000 | 0.45271 | 0.00000 | 1.0362 |
| 1114 | 1115 | 0.0229 | 0.08145 | 0.02136 | 0.0000 |
| 1114 | 1115 | 0.0229 | 0.08145 | 0.02136 | 0.0000 |
| 1114 | 2104 | 0.0000 | 0.08670 | 0.00000 | 0.9400 |
| 1114 | 2104 | 0.0000 | 0.08670 | 0.00000 | 0.9400 |
| 6109 | 1115 | 0.0000 | 0.38740 | 0.00000 | 0.0000 |
| 6110 | 1115 | 0.0000 | 0.38740 | 0.00000 | 0.0000 |
| 6111 | 1115 | 0.0000 | 0.38740 | 0.00000 | 0.0000 |
| 2101 | 3104 | 0.0379 | 0.07312 | 0.00138 | 0.0000 |
| 2101 | 3110 | 0.1230 | 0.22161 | 0.00406 | 0.0000 |
| 2101 | 3214 | 0.0387 | 0.07446 | 0.00142 | 0.0000 |
| 2101 | 4209 | 0.0700 | 0.24588 | 0.00416 | 0.0000 |
| 2101 | 5201 | 0.1650 | 0.58000 | 0.00980 | 0.0000 |
| 2102 | 3208 | 0.0446 | 0.09608 | 0.00180 | 0.0000 |
| 2102 | 3209 | 0.0444 | 0.09564 | 0.00100 | 0.0000 |
| 2102 | 3210 | 0.0322 | 0.06107 | 0.00112 | 0.0000 |
| 2103 | 3206 | 0.0909 | 0.22540 | 0.00420 | 0.0000 |
| 2103 | 3207 | 0.0909 | 0.22540 | 0.00444 | 0.0000 |
| 2103 | 5103 | 0.0649 | 0.22800 | 0.00380 | 0.0000 |
| 2104 | 3103 | 0.0292 | 0.06895 | 0.00128 | 0.0000 |
| 2104 | 3103 | 0.0206 | 0.06694 | 0.00132 | 0.0000 |
| 2104 | 3103 | 0.0206 | 0.06694 | 0.00132 | 0.0000 |
| 2104 | 3204 | 0.0749 | 0.16825 | 0.00316 | 0.0000 |
| 2104 | 3205 | 0.0738 | 0.16631 | 0.00312 | 0.0000 |
| 2104 | 4106 | 0.0418 | 0.13600 | 0.00270 | 0.0000 |
| 2104 | 4106 | 0.0418 | 0.13600 | 0.00270 | 0.0000 |
| 2104 | 5203 | 0.1360 | 0.47209 | 0.00810 | 0.0000 |
| 3101 | 3103 | 0.0488 | 0.17911 | 0.00234 | 0.0000 |
| 3101 | 3105 | 0.0163 | 0.05983 | 0.00078 | 0.0000 |
| 3102 | 3103 | 0.0488 | 0.17911 | 0.00234 | 0.0000 |
| 3102 | 3105 | 0.0163 | 0.05983 | 0.00078 | 0.0000 |
| 3103 | 3108 | 0.0287 | 0.05201 | 0.00094 | 0.0000 |
| 3103 | 3202 | 0.0280 | 0.06610 | 0.00120 | 0.0000 |
| 3103 | 3203 | 0.0280 | 0.06610 | 0.00120 | 0.0000 |
| 3104 | 3112 | 0.0072 | 0.01303 | 0.00024 | 0.0000 |
| 6201 | 3104 | 0.0000 | 0.58333 | 0.00000 | 1.0000 |
| 3105 | 3106 | 0.0279 | 0.05320 | 0.00094 | 0.0000 |
| 6127 | 3105 | 0.0000 | 0.48000 | 0.00000 | 1.0000 |
| 6128 | 3105 | 0.0000 | 0.21600 | 0.00000 | 1.0000 |
| 3106 | 3109 | 0.0690 | 0.12427 | 0.00236 | 0.0000 |
| 3106 | 6207 | 0.0000 | 1.0000 | 0.00000 | 1.0000 |
| 3107 | 4209 | 0.1230 | 0.22161 | 0.00406 | 0.0000 |
| 6202 | 3107 | 0.0000 | 0.31818 | 0.00000 | 1.0000 |

| | | | | | |
|------|------|--------|---------|---------|--------|
| 3108 | 3215 | 0.0467 | 0.08892 | 0.00132 | 0.0000 |
| 3109 | 3111 | 0.0507 | 0.09616 | 0.00144 | 0.0000 |
| 3109 | 3201 | 0.1080 | 0.20479 | 0.00352 | 0.0000 |
| 3110 | 3213 | 0.0765 | 0.13793 | 0.00246 | 0.0000 |
| 3111 | 3112 | 0.0173 | 0.03288 | 0.00056 | 0.0000 |
| 6115 | 3111 | 0.0000 | 1.83233 | 0.00000 | 1.0000 |
| 6133 | 3113 | 0.0000 | 0.22733 | 0.00000 | 1.0000 |
| 3201 | 3216 | 0.0645 | 0.12282 | 0.00174 | 0.0000 |
| 3211 | 3213 | 0.0613 | 0.11050 | 0.00210 | 0.0000 |
| 6203 | 3211 | 0.0000 | 0.58333 | 0.00000 | 1.0000 |
| 3212 | 4209 | 0.0613 | 0.11050 | 0.00210 | 0.0000 |
| 6204 | 3212 | 0.0000 | 0.35000 | 0.00000 | 1.0000 |
| 4101 | 4106 | 0.0451 | 0.15863 | 0.00268 | 0.0000 |
| 4101 | 4108 | 0.1474 | 0.51650 | 0.00880 | 0.0000 |
| 4102 | 4104 | 0.0545 | 0.19130 | 0.00324 | 0.0000 |
| 4102 | 4107 | 0.0491 | 0.17251 | 0.00292 | 0.0000 |
| 4102 | 4109 | 0.0745 | 0.26120 | 0.00440 | 0.0000 |
| 4103 | 4104 | 0.1107 | 0.38840 | 0.00656 | 0.0000 |
| 4105 | 4108 | 0.0663 | 0.23260 | 0.00400 | 0.0000 |
| 4107 | 4203 | 0.0576 | 0.20204 | 0.00342 | 0.0000 |
| 6114 | 4107 | 0.0000 | 0.73800 | 0.00000 | 1.0000 |
| 4108 | 4109 | 0.0745 | 0.26120 | 0.00440 | 0.0000 |
| 4201 | 4207 | 0.2737 | 0.34540 | 0.00460 | 0.0000 |
| 4201 | 4210 | 0.0934 | 0.32760 | 0.00560 | 0.0000 |
| 4202 | 4204 | 0.0593 | 0.20790 | 0.00360 | 0.0000 |
| 4202 | 4206 | 0.1284 | 0.45111 | 0.00762 | 0.0000 |
| 4202 | 4209 | 0.0700 | 0.24588 | 0.00416 | 0.0000 |
| 4203 | 4210 | 0.0084 | 0.02960 | 0.00050 | 0.0000 |
| 4205 | 4207 | 0.2831 | 0.35660 | 0.00480 | 0.0000 |
| 4205 | 4208 | 0.1700 | 0.20690 | 0.00300 | 0.0000 |
| 4206 | 4210 | 0.0522 | 0.18342 | 0.00310 | 0.0000 |
| 6116 | 4208 | 0.0000 | 2.33333 | 0.00000 | 1.0000 |
| 6205 | 4209 | 0.0000 | 0.28000 | 0.00000 | 1.0000 |
| 5101 | 5104 | 0.0931 | 0.32720 | 0.00560 | 0.0000 |
| 5101 | 5107 | 0.0790 | 0.27720 | 0.00460 | 0.0000 |
| 5102 | 5104 | 0.2539 | 0.89230 | 0.01500 | 0.0000 |
| 5102 | 5105 | 0.1805 | 0.63450 | 0.01080 | 0.0000 |
| 5102 | 5106 | 0.0508 | 0.17820 | 0.00300 | 0.0000 |
| 5103 | 5107 | 0.0152 | 0.05350 | 0.00080 | 0.0000 |
| 5104 | 5205 | 0.1532 | 0.48850 | 0.01000 | 0.0000 |
| 6124 | 5105 | 0.0000 | 1.40000 | 0.00000 | 1.0000 |
| 6113 | 5106 | 0.0000 | 0.76561 | 0.00000 | 0.9710 |
| 5107 | 5302 | 0.0847 | 0.29700 | 0.00500 | 0.0000 |
| 5201 | 5204 | 0.2251 | 0.79080 | 0.01340 | 0.0000 |
| 5202 | 5204 | 0.1150 | 0.36690 | 0.00756 | 0.0000 |
| 5202 | 5205 | 0.0766 | 0.24460 | 0.00504 | 0.0000 |
| 5203 | 5204 | 0.5192 | 0.63225 | 0.00924 | 0.0000 |
| 6112 | 5203 | 0.0000 | 0.65530 | 0.0000 | 1.0000 |
| 5301 | 5303 | 0.0847 | 0.29700 | 0.0500 | 0.0000 |
| 5302 | 5303 | 0.1213 | 0.42560 | 0.0720 | 0.0000 |
| 6118 | 6122 | 0.0000 | 0.00011 | 0.0000 | 1.0000 |
| 6121 | 6122 | 0.0000 | 0.00011 | 0.0000 | 1.0000 |
| 6121 | 6122 | 0.0000 | 0.00011 | 0.0000 | 1.0000 |



**CENTRO DE INVESTIGACION Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN
UNIDAD GUADALAJARA**

El Jurado designado por la Unidad Guadalajara del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, aprobó la tesis: “**Desarrollo de técnicas de análisis lineal para el estudio de estabilidad de voltaje y la implementación de medidas de control basadas en dispositivos FACTS**” que presenta el Ing. Marco Antonio Pérez González el día 11 de Mayo de 2001.

EL JURADO

Dr. Arturo Román Messina
Investigador Cinvestav 3 A
CINVESTAV DEL IPN
Guadalajara.

Dr. Juan Manuel Ramírez Arredondo
Investigador Cinvestav 3 A
CINVESTAV DEL IPN
Guadalajara.

Dr. José Manuel Cañedo Castañeda
Investigador Cinvestav 2 C
CINVESTAV DEL IPN
Guadalajara

Dr. Claudio Rubén Fuerte Esquivel
Profesor Investigador Titular C
Programa de Graduados en Ingeniería Eléctrica
Instituto Tecnológico de Morelia

Dr. José Horacio Tovar Hernández
Profesor Investigador Titular C
Programa de Graduados en Ingeniería Eléctrica
Instituto Tecnológico de Morelia



CINVESTAV
BIBLIOTECA CENTRAL



SSIT000003914