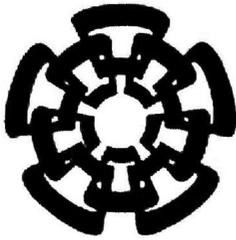


x(97952.1)



CINVESTAV

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN
Unidad Guadalajara

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE CONSIDERANDO LAS CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE LA CARGA Y DISPOSITIVOS DE CONTROL DE VOLTAJE

Tesis que presenta

Enrique Hernández Alvarez

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

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

En la especialidad de
Ingeniería Eléctrica



Guadalajara, Jalisco, Septiembre de 2001

CLASIF.	Tesis 2002
ADQUIS.	
FECHA	19/04/02
PROCED	Serv. Bibliográficos

Serv. Bibliográficos

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE
CONSIDERANDO LAS CARACTERÍSTICAS
DINÁMICAS DE LA CARGA Y DISPOSITIVOS DE
CONTROL DE VOLTAJE**

**Tesis de Maestría en Ciencias
Ingeniería Eléctrica**

Por:

Enrique Hernández Alvarez

Ingeniero Eléctrico
Instituto Tecnológico de Morelia, 1994 - 1999

Becario de CONACyT, expediente No. 143834

Director de Tesis:

Dr. Arturo Román Messina

CINVESTAV del IPN Unidad Guadalajara, Septiembre de 2001

Dedico esta tesis a mi hermana, mi padre, mi abuela sin su apoyo y confianza este trabajo no hubiera sido posible. Especialmente a mi madre, Rafaela Alvarez Serrano ya que este trabajo es mas suyo que mío, “ gracias mamá porque siempre has tenido confianza en mí y sobre todo por el gran amor que yo se me tienes ”

A todas aquellas personas que han creído en mí.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haber puesto en mi camino a personas que siempre estuvieron dispuestas a apoyarme.

A Faby, Lupita, Marisol, Héctor, Ivan, Ixtláhuatl, Lalo, Memo, Pancho, Pável y Ramón, por todos los momentos inolvidables que hemos pasado juntos, principalmente por haberme enseñado lo que es la verdadera amistad. Hace dos años cuando inicio esta aventura eran unos desconocidos y ahora son amigos de los que duran para toda la vida.

A mi asesor el Dr. Arturo Román Messina por todo el tiempo dedicado a este trabajo, por su disposición y paciencia para aceptar mi forma de trabajo.

A la familia Zaragoza Pelayo por haberme acogido en su casa durante gran parte del desarrollo de este trabajo.

A mis paisanos de Morelia quienes siempre tuvieron una palabra de aliento para mí y estuvieron dispuesto a apoyar a mi familia en momentos difíciles.

A la gran familia que conforma el CINVESTAV Guadalajara, catedráticos, alumnos, administrativos, en general a todos. Especialmente a los doctores que integran el grupo de sistemas de potencia, en todo momento estuvieron dispuestos a ayudarme.

Al CONACyT por el apoyo económico durante estos dos años, sin él este trabajo no habría sido posible.

RESUMEN

El trabajo de investigación que se presenta en esta tesis se centra en el análisis de la estabilidad de voltaje de mediano plazo considerando el efecto de las características de la carga y su interacción con los modelos de dispositivos de control de voltaje en la red de transmisión. Más concretamente, se define y estudia un tipo de modelo de carga con características deseables para el estudio de la estabilidad de voltaje; los modelos genéricos de carga derivados de pruebas de campo o de la aplicación de técnicas de identificación y se analiza la influencia de la aplicación de dispositivos de control para mejorar los márgenes de estabilidad del sistema. Se estudian, asimismo, alternativas al modelado de sistemas de potencia para el estudio de la estabilidad de voltaje en sistemas complejos.

Se presenta, en primer lugar, un análisis fundamental de las características de estabilidad de voltaje en un sistema simplificado de potencia y se introduce el método de análisis adoptado. Se muestra que el fenómeno de inestabilidad se manifiesta como una bifurcación tipo singular inducida del modo crítico de voltaje cuando se opera el sistema bajo condiciones de estrés. A continuación, se analiza la contribución de la acción de dispositivos de control al margen de estabilidad y se deducen criterios de análisis de estabilidad basados en el estudio de dicho modo.

Se propone, a continuación, un modelo lineal del sistema de potencia con características deseables para el estudio de la estabilidad de voltaje de mediano plazo y se interpretan las características de estabilidad en el contexto del estudio de sistemas complejos. La herramienta de análisis propuesta se basa en la noción física de que el comportamiento de los sistemas de control de voltaje en los generadores es muy rápido respecto al comportamiento de la carga y tiene su principal aplicación en el estudio preliminar de la estabilidad de voltaje de mediano y largo plazo. A partir de este modelo, se propone una herramienta analítica basada en la aplicación de técnicas de análisis lineal para abordar el problema de determinación de áreas críticas de voltaje y la contribución de dispositivos de control al mejoramiento de la estabilidad de voltaje.

Por último, se presenta la aplicación de los métodos de estudio propuestos al análisis de estabilidad de voltaje en una red eléctrica derivada del sistema Peninsular Mexicano. Se discute la influencia de dispositivos de control de voltaje en el fenómeno de estabilidad y se presenta una comparación con los resultados obtenidos mediante otras técnicas de análisis, específicamente, el estudio de curvas Q-V y el análisis modal de las ecuaciones de flujos de potencia.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	v
ÍNDICE GENERAL	vi
LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 REVISIÓN DEL TRABAJO PREVIO	2
1.2.1 REPRESENTACIÓN DE LA CARGA EN ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE.....	2
1.2.2 MÉTODOS DE ANÁLISIS DINÁMICOS Y QUASI-DINÁMICOS DEL SISTEMA DE POTENCIA.....	3
1.2.3 ANÁLISIS DE BIFURCACIONES EN MODELOS DINÁMICOS DEL SISTEMA DE POTENCIA.....	4
1.3 OBJETIVO DE LA TESIS	4
1.4 APORTACIONES DE LA TESIS	4
1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	5

CAPÍTULO 2

MODELOS GENÉRICOS DE CARGA

2.1 INTRODUCCIÓN	6
2.2 MODELOS GENÉRICOS DE CARGA	6
2.2.1 MODELOS GENÉRICOS DE CARGA CON CARACTERÍSTICA DE RECUPERACIÓN EXPONENCIAL.....	7
2.2.2 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL MODELO GENÉRICO.....	8
2.2.3 IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA CARGA.....	11
2.2.4 EL CONCEPTO DE POTENCIA DE RECUPERACIÓN.....	12
2.3 EFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA EN EL FENÓMENO DE INESTABILIDAD DE VOLTAJE	12
2.3.1 MODELO NO LINEAL DEL SISTEMA DE ESTUDIO.....	13
2.3.2 RESPUESTA DEL SISTEMA ANTE GRANDES PERTURBACIONES.....	14
2.3.3 PUNTOS DE EQUILIBRIO ESTABLES E INESTABLES.....	15
2.4 EFECTO DE LA ACCIÓN DE DISPOSITIVOS DE CONTROL EN EL MARGEN DE ESTABILIDAD	20
2.4.1 MARGEN DE ESTABILIDAD DE ESTADO ESTABLE.....	20
2.4.2 CARACTERÍSTICAS DE ESTABILIDAD DEL SISTEMA CON COMPENSACIÓN EN PARALELO.....	22

CAPÍTULO 3

MODELADO DEL SISTEMA DE POTENCIA

3.1 INTRODUCCIÓN	25
3.2 ESTRUCTURA DEL MODELO PSEUDO-DINÁMICO DEL SISTEMA	25
3.2.1 MODELADO DINÁMICO DE LA CARGA	26
3.2.2 MODELADO DE LA RED DE TRANSMISIÓN	28
3.3 MODELO PSEUDO-DINÁMICO DEL SISTEMA: FORMULACIÓN BASADA EN EL ESTUDIO DE VOLTAJES NODALES	29
3.3.1 REPRESENTACIÓN PARCIAL DE ESTADO.....	29
3.3.2 CARACTERÍSTICAS DE ESTABILIDAD DEL SISTEMA	31
3.3.3 REPRESENTACIÓN DE DISPOSITIVOS DE CONTROL DE VOLTAJE.....	33
3.3.3.1 <i>Modelo dinámico</i>	34
3.3.3.2 <i>Ecuaciones modificadas de flujo de potencia</i>	35
3.3.4 MODELO GLOBAL DE ESTADO.....	36
3.3.5 DETERMINACIÓN DE ÁREAS CRÍTICAS DE VOLTAJE E IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS DE CONTROL DOMINANTES.....	38
3.4 MODELO DE ESTADO BASADO EN EL CONCEPTO DE POTENCIA DE RECUPERACIÓN	39
3.4.1 INTERFAZ ENTRE LAS ECUACIONES DE LA CARGA Y LA RED DE TRANSMISIÓN	39
3.4.2 MODELO PARCIAL DE ESTADO	40
3.4.3 FORMULACIONES ALTERNAS PARA EL ESTUDIO DE REDES DE GRAN DIMENSIÓN	41
3.4.3.1 <i>Inclusión de dispositivos de control</i>	41
3.5 ALGORITMO COMPUTACIONAL PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE	42
3.5.1 DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE EQUILIBRIO EN ESTADO ESTABLE	42

CAPÍTULO 4

APLICACIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN	44
4.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EN ESTUDIO	44
4.3 ANÁLISIS MODAL DE LAS ECUACIONES DE FLUJOS DE POTENCIA	46
4.3.1 ANÁLISIS DEL CASO BASE DE OPERACIÓN.....	47
4.3.2 DETERMINACIÓN DE LA CONDICIÓN DE MÁXIMA CARGABILIDAD	49
4.3.3 EFECTO DE CONTROL DE VOLTAJE EN EL MARGEN DE ESTABILIDAD DE ESTADO ESTABLE.....	51
4.4 ANÁLISIS DINÁMICO	54
4.4.1 EFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA EN EL ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE	54
4.4.2 MARGEN DE ESTABILIDAD BAJO CONDICIONES DE ESTRÉS	56
4.4.3 EFECTO DEL CONTROL DE VOLTAJE EN EL MARGEN DE ESTABILIDAD	58
4.4.3.1 <i>Controlabilidad y observabilidad de los modos críticos</i>	59
4.4.3.2 <i>Efecto de la acción de control</i>	61
4.4.3.3 <i>Efecto del ajuste en los parámetros de control</i>	63
4.4.4 COMPARACIÓN CON LA APLICACIÓN DE STATCOM.....	64

CAPÍTULO 5
CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES GENERALES67

5.2 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....67

REFERENCIAS68

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Características de estabilidad del modo de voltaje considerando $Q_o = 0$ y $Q_o = Q_{max}$	17
Tabla 2.2	Características de estabilidad del sistema en estudio	18
Tabla 2.3	Parámetros para el ejemplo utilizado	19
Tabla 2.4	Parámetros utilizados para el sistema en estudio	23
Tabla 4.1	Factores de participación asociados a los modos críticos de voltaje.....	47
Tabla 4.2	Sensitividades de los modos críticos con respecto a la reactancia serie de las líneas de transmisión.....	49
Tabla 4.3	Factores de participación nodal para la condición de máxima cargabilidad.....	51
Tabla 4.4	Modos críticos de voltaje en la condición de máxima cargabilidad.....	53
Tabla 4.5	Características de la carga consideradas en el estudio	54
Tabla 4.6	Factores de participación en el punto de operación base correspondientes al caso 1	55
Tabla 4.7	Factores de participación nodal para el punto de operación base, caso 2	56
Tabla 4.8	Parámetros de CEV utilizados en el estudio	58
Tabla 4.9	Factores de participación nodal considerando la inclusión de CEV	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Característica típica de respuesta de la carga ante un cambio escalón en el voltaje en terminales [20].	7
Figura 2.2	Efecto del parámetro α_s en el comportamiento de la carga	10
Figura 2.3	Efecto del parámetro α_t en el comportamiento de la carga	10
Figura 2.4	Efecto de la constante tiempo T_p en el comportamiento de la carga	10
Figura 2.5	Influencia de los parámetros α_s , α_t y T_p en el comportamiento de la carga	11
Figura 2.6	Sistema simplificado de estudio bus infinito-carga	13
Figura 2.7	Gráfico de la variación del voltaje en el nodo de carga ante el disparo de una línea de transmisión.....	14
Figura 2.8	Gráfico de la variación del voltaje en el nodo de carga, considerando diferentes tiempos de conexión del banco de capacitores.....	15
Figura 2.9	Curva Q-V y características de la carga.....	16
Figura 2.10	Comportamiento del modo de voltaje λ_v ante incrementos en Q_d	19
Figura 2.11	Curvas características V-I del CEV y STATCOM	21
Figura 2.12	Curvas Q-V del sistema carga – bus infinito considerando diferentes dispositivos de compensación	23
Figura 2.13	Valores propios asociados a voltaje.....	24
Figura 3.1	Representación esquemática del modelo de la carga	27
Figura 3.2	Representación en diagrama de bloques del modelo de estado del sistema.....	30
Figura 3.3	Sistema bus infinito – carga.....	32
Figura 3.4	Modelo dinámico del STATCOM	34
Figura 3.5	Característica en estado estable del STATCOM.....	34
Figura 3.6	Algoritmo computacional para el análisis de estabilidad de voltaje	43
Figura 4.1	Diagrama geográfico del sistema en estudio mostrando la ubicación de los elementos principales de generación, transmisión y compensación existentes.....	45
Figura 4.2	Distribución de potencia aparente demandada en el sistema en estudio.....	45
Figura 4.3	Gráfico del perfil de voltaje del SPM correspondiente al caso base de operación.....	46
Figura 4.4	Ubicación geográfica de las áreas críticas de voltaje correspondientes al caso base de operación. No se consideran dispositivos de control de voltaje.	48
Figura 4.5	Comportamiento de los modos críticos de voltaje en función del nivel de carga del sistema y los generadores que alcanzan sus límites de operación	49
Figura 4.6	Perfil de voltajes en la condición de máxima cargabilidad.....	50
Figura 4.7	Curva demanda – voltaje para el nodo BUS-18.....	50

Figura 4.8	Ubicación geográfica de las áreas críticas de voltaje para la condición de máxima cargabilidad ...	51
Figura 4.9	Perfil de voltajes considerando CEV	52
Figura 4.10	Curvas voltaje – demanda en nodos críticos ilustrando el efecto de la aplicación de control de voltaje	52
Figura 4.11	Ubicación de áreas críticas de voltaje considerando la aplicación de 3 CEV	53
Figura 4.12	Respuesta de la carga ante un escalón de voltaje considerando los parámetros de la Tabla 5.8..	55
Figura 4.13	Comportamiento del modo crítico de voltaje para los casos de operación considerados.....	57
Figura 4.14	Comportamiento del determinante de las submatrices de estado.....	58
Figura 4.15	Indices de observabilidad para el modo crítico.....	59
Figura 4.16	Factores de participación para el modo crítico considerando la inclusión de 3 CEV	59
Figura 4.17	Factores de observabilidad para el modo 2.....	60
Figura 4.18	Areas críticas de voltaje considerando la inclusión de CEV.....	61
Figura 4.19	Indices de controlabilidad para los modos 1 y 2.....	62
Figura 4.20	Residuos de la función de transferencia $\frac{\Delta V_{d^i}}{\Delta V_{ref^j}}$ para el modo λ_{v1}	63
Figura 4.21	Residuos de la función de transferencia $\frac{\Delta V_{d^i}}{\Delta V_{ref^j}}$ para el modo λ_{v2}	63
Figura 4.22	Efecto del control de voltaje en los márgenes de estabilidad del sistema	64
Figura 4.23	Característica de control utilizada en la representación del STATCOM	65
Figura 4.24	Curva λ_{v1} – demanda considerando compensación en el nodo BUS-87	65
Figura 4.25	Curvas demanda – V en el nodo BUS-87, considerando compensación de potencia reactiva.....	66

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

El fenómeno de inestabilidad de voltaje tiene su origen en la incapacidad de un sistema de potencia para satisfacer el incremento en la demanda de potencia reactiva ante una perturbación [1-3]. En este proceso, las características de la carga, así como la ubicación, capacidad y estrategia de operación de los dispositivos de control en zonas vulnerables del sistema tienen un efecto fundamental en el margen de estabilidad.

Convencionalmente, los métodos de análisis utilizados actualmente por la industria para el análisis de la estabilidad de voltaje se basan en el uso de las ecuaciones de flujos de potencia modificadas para incluir la representación en estado estable de los componentes del sistema [4]. Mediante consideraciones adecuadas, este tipo de modelos permiten un estudio preliminar del comportamiento del sistema así como el desarrollo de medidas correctivas.

Una limitación importante de este tipo de técnicas, sin embargo, es su incapacidad para permitir un análisis de las características fundamentales de éste fenómeno y pueden conducir a una evaluación incorrecta de los márgenes de estabilidad, las zonas críticas del sistema susceptibles a presentar problemas de voltaje y el desarrollo de medidas correctivas.

El análisis de distintos eventos de inestabilidad en sistemas reales muestra que el fenómeno de inestabilidad de voltaje se manifiesta como un proceso generalmente lento el cual puede ser influenciado por las características del sistema y la operación de equipo de protección y control. De entre estos factores, caben destacar los siguientes [5-8]:

- La operación de sistema en condiciones de estrés, por ejemplo, asociadas a la carga excesiva de enlaces de transmisión y la salida de operación de líneas de transmisión y generadores.
- La falta de soporte adecuado de potencia reactiva en zonas críticas del sistema.

Las características de la carga, particularmente ante condiciones de operación de voltaje bajo.

La respuesta de la acción de control en transformadores con cambio automático de derivación bajo carga.

- La operación indeseable de dispositivos de protección durante condiciones de voltaje bajo.

La creciente complejidad de los sistemas de potencia, por otro lado, ha motivado el desarrollo de herramientas analíticas que permitan evaluar, en forma aproximada, el efecto de los elementos con mayor influencia en la estabilidad del sistema. Destacan, por su mayor aplicación, los métodos de análisis modal del modelo estático o dinámico del sistema de potencia.

En el presente trabajo de tesis se aborda, de manera específica, el análisis de la estabilidad de voltaje de mediano y largo plazo, con un énfasis particular en el estudio de la influencia de la carga y la acción de dispositivos de control ubicados en la red de transmisión en la estabilidad del sistema. La herramienta de análisis propuesta puede verse como una extensión de los métodos convencionales de análisis modal para representar en forma explícita dichas características. El método de análisis propuesto, sin embargo, puede generalizarse para considerar la inclusión de otros elementos de control en el sistema de potencia.

1.2 REVISIÓN DEL TRABAJO PREVIO

Los métodos actuales de análisis de estabilidad pueden clasificarse en dos grandes categorías; métodos de análisis estático basados en la modificación de las ecuaciones de flujos de potencia y métodos de análisis dinámico. Los métodos de análisis estático asumen, en general, que el sistema opera en una condición de estado estable y que los cambios de operación son pequeños. Las referencias [3,4] resumen los principales métodos de análisis existentes.

En los siguientes apartados, se revisa los trabajos basados en enfoques de estudio de tipo dinámico, agrupados temáticamente.

1.2.1 Representación de la carga en estudios de estabilidad de voltaje

En la última década ha habido un desarrollo importante de métodos de modelado de las características de la carga para el estudio de la estabilidad de voltaje. Sin embargo, se dispone de relativamente pocos estudios analíticos que proporcionen criterios para evaluar de manera sistemática su efecto en el fenómeno de estabilidad de voltaje.

Los métodos de representación del comportamiento dinámico de la carga se pueden clasificar según tres categorías:

1. Métodos basados en la representación de componentes. En este tipo de modelos destacan las representaciones individuales de elementos tales como motores de inducción [9] o modelos compuestos que toman en cuenta conjuntos de cargas agregadas [10].
2. Modelos genéricos de cargas derivados de pruebas en campo [11-15]. Estos modelos representan relaciones entrada-salida y se describen con mayor amplitud en el capítulo 2 de este trabajo.

3. Modelos basados en la aplicación de técnicas de identificación lineal o no lineal. Destacan, entre este tipo de modelos, los basados en la aplicación de técnicas como redes neuronales [16].

En los primeros trabajos en este campo, se propusieron diversos modelos orientados hacia la representación de elementos específicos tales como motores de inducción y las características de control de transformadores. Así, por ejemplo, en 1985 [1] se propone un modelo dinámico de pequeña señal, el cual representa los generadores mediante un modelo de tercer orden; las cargas se representaron mediante modelos dinámicos para transformadores con cambio automático de derivación y modelos simplificados de motores de inducción.

En [12] se discute la importancia de representar la carga mediante un modelo apropiado, así como las consecuencias de utilizar modelos estáticos en el modelado de cargas de naturaleza dinámica.

En 1994, Hill [13] presenta el primer intento de un modelo dinámico de pequeña señal, el cual se basa en la representación de las cargas mediante un modelo genérico de recuperación exponencial ante un escalón de voltaje.

La importancia que tiene el modelado de la carga en el fenómeno de estabilidad de voltaje es presentada en [14], además de plantear varias inquietudes como es la presencia de zonas detectadas como estables en la parte inferior de la curva P-V.

1.2.2 Métodos de análisis dinámicos y quasi-dinámicos del sistema de potencia

En esta línea de investigación se han propuesto diferentes metodologías basadas en modelos dinámicos y modelos compuestos de ecuaciones diferenciales y algebraicas. La referencia [17] describe con amplitud el desarrollo de herramientas de análisis derivadas de modelos dinámicos del sistema de potencia.

En el contexto del presente trabajo de Tesis, Marannino et al propusieron un método de análisis basado en el estudio de los modos de voltaje en un modelo pseudo-dinámico del sistema de potencia [18]. En las referencias [15 y 18] se retoma el modelo propuesto por Hill en 1985; se presenta la influencia que tienen los parámetros de la carga sobre el límite de estabilidad del sistema y se muestra su aplicación en sistemas pequeños, un sistema equivalente de la red de transmisión de 500 kV de B.C Hydro y un sistema compuesto por cinco nodos. En estas investigaciones, sin embargo, no se presenta un análisis teórico del efecto de las características de la carga en la estabilidad de voltaje. Adicionalmente, no se considera la representación de dispositivos de control de voltaje.

1.2.3 Análisis de bifurcaciones en modelos dinámicos del sistema de potencia

En estos enfoques, la estabilidad del sistema ante disturbios pequeños se interpreta en el contexto de la teoría de bifurcaciones en sistemas dinámicos. Una primera serie de trabajos se han dedicado a establecer la existencia de bifurcaciones en los valores propios del sistema. En [19], se muestra que la pérdida de estabilidad puede asociarse a que un punto de equilibrio estable desaparece en una bifurcación tipo Hopf. Otros estudios muestran que la estabilidad de voltaje se pierde como una bifurcación tipo silla; la pérdida de estabilidad es de tipo aperiódico y se produce un cambio en el número de puntos de equilibrio estable del sistema.

Cabe destacar que este tipo de aplicaciones han sido restringidas al análisis de estabilidad de voltaje en sistema simplificados.

1.3 OBJETIVO DE LA TESIS

El principal objetivo de esta tesis es el desarrollo de una metodología analítica para el estudio de estabilidad de voltaje de mediano y largo plazo que permita estudiar el efecto de las características dinámicas de la carga y la acción de dispositivos de control de voltaje en el margen de estabilidad.

1.4 APORTACIONES DE LA TESIS

Las principales aportaciones de este trabajo son:

- El desarrollo de un modelo dinámico de pequeña señal que permite representar las características del sistema con mayor relevancia en el fenómeno de inestabilidad de voltaje.
- La identificación de características fundamentales de estabilidad de voltaje de un modelo dinámico del sistema de potencia; específicamente, el estudio de bifurcaciones tipo silla y el análisis de la acción de dispositivos de control en el margen de estabilidad.
- El desarrollo de herramientas analíticas basadas en técnicas de análisis lineal para la identificación de modos críticos de voltaje, la ubicación de zonas críticas del sistema y el desarrollo de medidas correctivas basadas en la aplicación de dispositivos de control de voltaje.
- La aplicación del modelo propuesto al análisis de estabilidad de voltaje en un sistema real y la identificación de bifurcaciones en este modelo.

1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

La estructura de la tesis es la siguiente. En el capítulo 2 se describen las características del modelo de carga adoptado y se presenta un análisis de las características de estabilidad en un sistema de potencia simplificado. De igual forma, mediante el análisis de un sistema sencillo bus infinito – carga, se muestra el efecto que tienen los dispositivos de control de voltaje sobre la estabilidad del sistema.

En el capítulo 3 se presentan dos opciones de modelado de un sistema de gran tamaño, se discuten las características de ambos y, además, se analizan las características de estabilidad de estos modelos.

En el capítulo 4 se muestra la aplicación del modelo propuesto en el análisis de un sistema con características reales, determinándose las áreas críticas del sistema asociadas a los tres modos de voltaje más débiles, así como el efecto de compensadores estáticos de potencia reactiva (CEV) y compensadores sincros (STATCOM por sus siglas en inglés) sobre dichos modos.

Finalmente, en el capítulo 5, se presentan las conclusiones finales del trabajo y se sugieren nuevas líneas de investigación en el área de estabilidad de voltaje.

CAPÍTULO 2

MODELOS GENÉRICOS DE CARGA

2.1 INTRODUCCIÓN

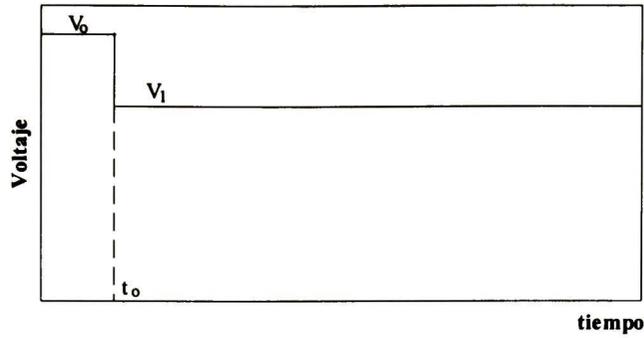
El modelado de la carga constituye uno de los aspectos más complejos en el estudio de la estabilidad de voltaje. Esta dificultad tiene su origen en la diversidad y ubicación de la carga, el efecto de la acción de equipo de control en las subestaciones, así como la característica de naturaleza aleatoria en la demanda. Por otro lado, resulta difícil, y a menudo impráctico, obtener modelos analíticos que expresen en forma explícita el comportamiento dinámico de los distintos dispositivos que constituyen la demanda de potencia en un nodo [2,20]. Esto ha motivado el desarrollo de una nueva clase de modelos orientados a representar el comportamiento de un conjunto de cargas en forma genérica.

En este capítulo, se define y estudia una clase de modelos de carga con características deseables para el estudio de estabilidad de voltaje: los modelos genéricos de la carga obtenidos mediante pruebas en el sistema. La estructura específica de este tipo de modelos los hace particularmente atractivos para el estudio de la estabilidad de voltaje de mediano y largo plazo proporcionando información que no es disponible en modelos convencionales. Mediante consideraciones apropiadas, estos modelos pueden reproducir de manera aproximada, el comportamiento de diversos elementos del sistema tales como motores de inducción, o cargas específicas.

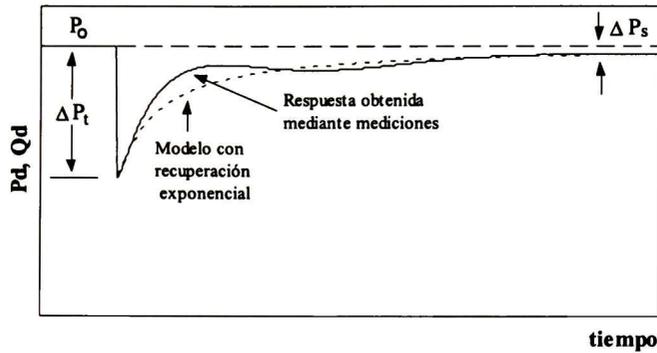
Se introducen, en primer lugar, las principales características de los modelos más comunes de representación de la carga reportados en la literatura. A continuación, se presenta la aproximación adoptada en este trabajo y se analizan las características básicas de este tipo de formulaciones. Por último, se aborda el estudio del efecto de las características de la carga en el fenómeno de estabilidad de voltaje en un sistema simplificado carga - bus infinito y se presenta un análisis del efecto de control de voltaje sobre las características de estabilidad del sistema.

2.2 MODELOS GENÉRICOS DE CARGA

El análisis de pruebas de campo en distintos sistemas, muestra que la respuesta de un conjunto de cargas ante un cambio incremental en el voltaje en terminales está caracterizada por un período transitorio de recuperación de naturaleza aproximadamente exponencial y un período de estado estable en que la carga se estabiliza en una nueva condición de equilibrio. En la Figura 2.1 se muestra el comportamiento típico de la carga ante una perturbación ilustrando la evolución de la potencia demandada.



a) Escalón de voltaje



b) Respuesta de la potencia activa

Figura 2.1.- Característica típica de respuesta de la carga ante un cambio escalón en el voltaje en terminales [20].

Dentro de los métodos de modelado de la carga se han desarrollado varias técnicas de características similares basadas en las respuestas observadas. Las referencias [2,21] sintetizan algunos de estos enfoques.

2.2.1 Modelos genéricos de carga con característica de recuperación exponencial

En esta clase de modelos, el comportamiento de la carga se expresa mediante una ecuación diferencial no lineal con recuperación transitoria que permite aproximar el comportamiento descrito en la Figura 2.1. Destacan, entre estas aproximaciones, los modelos genéricos propuestos por Hill y otros investigadores. En este tipo de enfoques, el comportamiento de la carga se expresa mediante las ecuaciones diferenciales [20]:

$$T_p \frac{d}{dt} P_d + P_d = P_s(V) + T_p \frac{dP_t}{dV} \quad (2.1)$$

y

$$T_q \frac{d}{dt} Q_d + Q_d = Q_s(V) + T_q \frac{dQ_t}{dV} \quad (2.2)$$

en donde P_s , Q_s , P_t y Q_t representan, respectivamente, las características de estado estable y transitorias de dependencia de voltaje de la carga definidas como

$$\begin{aligned} P_s(V) &= P_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_s} \\ Q_s(V) &= Q_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_s} \end{aligned} \quad (2.3)$$

y

$$\begin{aligned} P_t(V) &= P_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_t} \\ Q_t(V) &= Q_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_t} \end{aligned} \quad (2.4)$$

en donde

α_s, β_s son los coeficientes de la carga asociados al comportamiento en estado estable

α_t, β_t son los coeficientes de la carga asociados al período transitorio

P_o, Q_o son la potencia activa y reactiva de la carga en la condición de prefalla

P_d, Q_d son la potencia activa y reactiva de la carga

T_p, T_q son las constantes de tiempo de recuperación de la potencia activa y reactiva de la carga

V es la magnitud de voltaje en el nodo de carga

V_o es la magnitud de voltaje en la condición de predisturbio

Es importante hacer notar que en estas definiciones, las características en estado estable $P_d(s)$, $Q_d(s)$ corresponden a los modelos de carga utilizados convencionalmente en el estudio de estabilidad de voltaje [12,22]; el modelo descrito por las ecuaciones (2.1) y (2.2) coincide con la representación de carga propuesta por el IEEE, cuando se desprecia el efecto de cambios en la frecuencia del sistema.

2.2.2 Características básicas del modelo genérico

En el presente apartado se revisan las características básicas del modelo de carga adoptado. El análisis se efectúa en el contexto de estabilidad de voltaje ante perturbaciones pequeñas; en consecuencia, se obtienen modelos incrementales de operación, considerando una frecuencia de operación constante y se asume que la perturbación aplicada es pequeña. Finalmente, debido a que las potencias activa y reactiva presentan cualitativamente el mismo comportamiento, el análisis se realiza considerando únicamente la potencia activa.

Considérese, con este objetivo, que el comportamiento de la potencia activa de la carga se describe por la ecuación (2.2). Substituyendo la ecuación (2.3) en la ecuación (2.4), y aplicando la transformada de Laplace al modelo lineal resultante, se obtiene:

$$T_p s(\Delta P_d - s P_t \Delta V) = s P_s \Delta V - \Delta P_d \quad (2.5)$$

de donde

$$\Delta P_d = \frac{\alpha_s P_o}{V_o} \left(\frac{1 + \frac{\alpha_t}{\alpha_s} T_p s}{1 + T_p s} \right) \Delta V \quad (2.6)$$

La solución en el dominio del tiempo de la ecuación (2.6) es de la forma

$$P_d(t) = P_s(V_1) + \left[P_s(V_o) - \frac{1}{T_p} \frac{dP_t}{dV} \Big|_{V_o} - P_s(V_1) + \frac{1}{T_p} \frac{dP_t}{dV} \Big|_{V_1} \right] e^{\frac{t-t_o}{T_p}} \quad (2.7)$$

para $t > t_o$

en donde t_o representa el instante en que se presenta el escalón de voltaje. Aplicando los teoremas del valor inicial y final a la ecuación (2.6), se obtiene:

$$\Delta P_{t \rightarrow 0} = \lim_{s \rightarrow \infty} \left\{ s \left(\alpha_s \frac{P_o}{V_o} \left(\frac{1 + \frac{\alpha_t}{\alpha_s} T_p s}{1 + T_p s} \right) \right) \frac{1}{s} \right\} = \alpha_t \frac{P_o}{V_o} \quad (2.9a)$$

y

$$\Delta P_{t \rightarrow \infty} = \lim_{s \rightarrow 0} \left\{ s \left(\alpha_s \frac{P_o}{V_o} \left(\frac{1 + \frac{\alpha_t}{\alpha_s} T_p s}{1 + T_p s} \right) \right) \frac{1}{s} \right\} = \alpha_s \frac{P_o}{V_o} \quad (2.9b)$$

En las figuras 2.2 y 2.3 se puede ver el efecto de los coeficientes α_s y α_t en el comportamiento de la carga, ante un cambio escalón de un 10% en el voltaje en terminales. Los parámetros T_p y α_t corresponden al promedio de los parámetros reportados en la referencia [20]. Como se observa, la potencia de la carga exhibe un período transitorio de naturaleza exponencial; finalmente, la carga se recupera a un valor de estado estable, alrededor de 800 segundos después de la perturbación. Cabe destacar que la potencia de carga regresa a la condición inicial P_o en el caso particular en que $\alpha_s=0$.

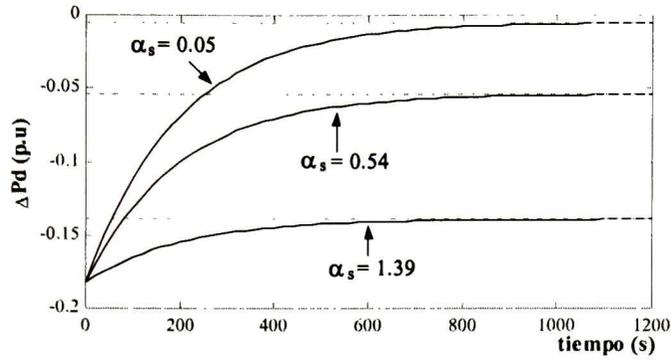


Figura 2.2.- Efecto del parámetro α_s en el comportamiento de la carga

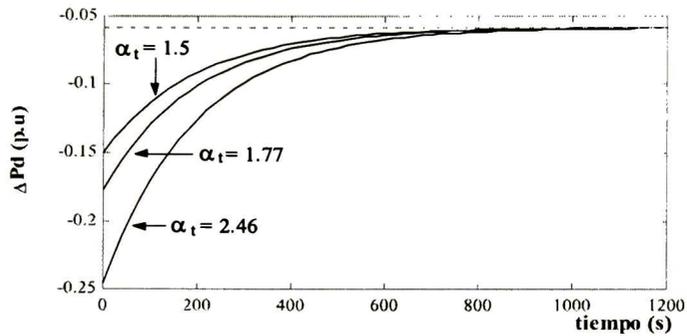


Figura 2.3.- Efecto del parámetro α_t en el comportamiento de la carga

La Figura 2.4 presenta las simulaciones obtenidas al considerar tres diferentes valores de la constante T_p . Los parámetros considerados para los coeficientes α_s y α_t corresponden a los valores promedio reportados en la literatura.

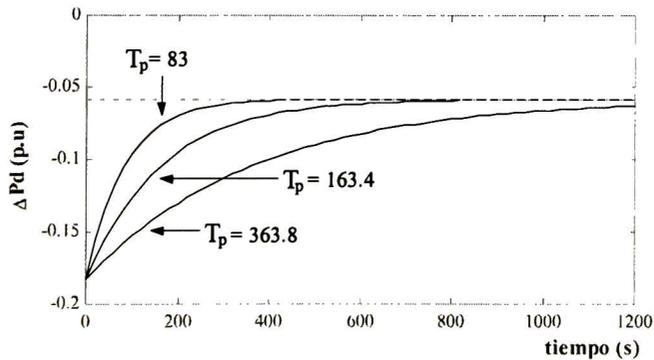


Figura 2.4.- Efecto de la constante tiempo T_p en el comportamiento de la carga

Se puede observar en la Figura 2.4 que la constante T_p determina el tiempo en el cual la potencia de carga alcanzará su valor de estado estable; conforme T_p aumenta, se incrementa el tiempo en el cual ΔP_d alcanza dicho valor.

En la Figura 2.5 se muestra gráficamente que la magnitud del escalón de la potencia de carga, el valor de estado estable postdisturbio y el tiempo en el cual se alcanza dicho valor son función de la constante α_t , el parámetro α_s y del tiempo de recuperación T_p , respectivamente.

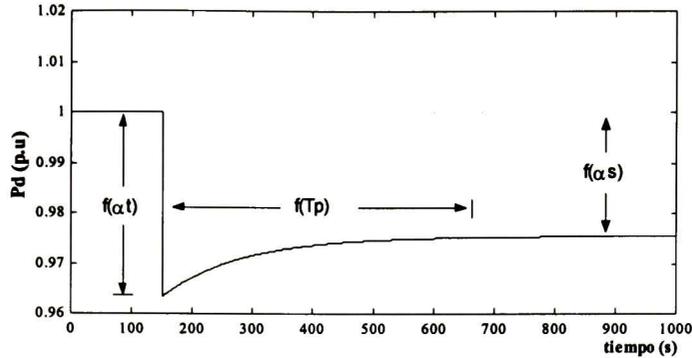


Figura 2.5.- Influencia de los parámetros α_s , α_t y T_p en el comportamiento de la carga

2.2.3 Identificación de los parámetros de la carga

La presente sección describe de manera breve la forma en la cual se pueden determinar los parámetros de la carga. Por simplicidad se muestra únicamente el cálculo de α_t , los coeficientes restantes, α_s , β_s , β_t , se obtienen de manera semejante.

La característica en estado transitorio de la potencia activa esta definida por la ecuación (2.4), linealizando dicha expresión y resolviendo para α_t se tiene:

$$\alpha_t \approx \frac{\Delta P_{pu}}{\Delta V_{pu}} \quad (2.10)$$

donde (ver Figura 2.1):

$$\Delta P = \Delta P_t$$

$$\Delta V = V_o - V_1$$

El parámetro de estado estacionario α_s , se calcula de manera semejante, en este caso $\Delta P = \Delta P_s$.

La ecuación (2.10) permite conocer el coeficiente para un determinado nivel de voltaje, con la finalidad de determinar los parámetros que describen a la carga conectada a los diferentes nodos del sistema, es necesario realizar varias pruebas considerando diferentes niveles de tensión y posteriormente mediante la técnica de mínimos cuadrados calcular los parámetros asociados al comportamiento de la carga para cada uno de los nodos de carga, en la referencia [23] se muestran mayores detalles.

2.2.4 El concepto de potencia de recuperación

Una interpretación interesante al modelo de carga se obtiene al definir una potencia de recuperación como la diferencia entre la potencia demandada y la potencia transitoria:

$$\begin{aligned}P_r &= P_d - P_i(V) \\ Q_r &= Q_d - Q_i(V)\end{aligned}\tag{2.11}$$

Substituyendo (2.11) en (2.1), se obtiene un conjunto de ecuaciones diferenciales y algebraicas de la forma

$$\begin{aligned}T_p \frac{dP_r}{dt} &= P_s(V) - P_d \\ T_q \frac{dQ_r}{dt} &= Q_s(V) - Q_d\end{aligned}\tag{2.12}$$

y

$$\begin{aligned}P_d &= P_r + P_i(V) \\ Q_d &= Q_r + Q_i(V)\end{aligned}$$

P_r, Q_r son la potencia activa y reactiva de recuperación

Una característica importante de esta formulación alterna, es la posibilidad de representar el comportamiento del sistema mediante una ecuación diferencial y una ecuación algebraica: esto permite desacoplar el modelo dinámico de la carga del modelo algebraico de la red de transmisión. Si bien, los modelos en (2.12) y (2.1) son equivalentes, el modelo basado en el concepto de la potencia de recuperación presenta características deseables para el estudio de la estabilidad de voltaje en redes de gran dimensión. En la sección 3.4 se discute con mayor detalle esta formulación.

2.3 EFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA EN EL FENÓMENO DE INESTABILIDAD DE VOLTAJE

Para clarificar la influencia de la carga en el fenómeno de estabilidad de voltaje, considérese que se desea estudiar el fenómeno de estabilidad de voltaje en el sistema mostrado en la Figura 2.6. En los estudios presentados, la carga se representa mediante un modelo de recuperación exponencial y se asume que la acción del sistema de excitación en el nodo generador es muy rápida comparada con el fenómeno en estudio.

Los parámetros utilizados en el análisis son los siguientes: $X = 0.037$ p.u., $T_p = 75.3$ seg., $\beta_s = 0.75$, $\beta_t = 5.22$ y $E=1.0$ p.u.; la potencia reactiva de la carga se considera como un parámetro ajustable y se asume, adicionalmente, que $P_d=0$.

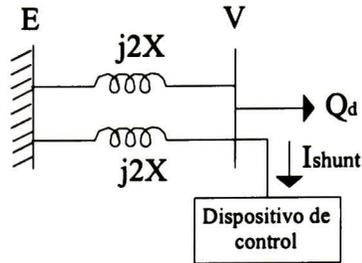


Figura 2.6.- Sistema simplificado de estudio bus infinito-carga

2.3.1 Modelo no lineal del sistema de estudio

El comportamiento dinámico del sistema puede describirse por las ecuaciones:

$$T_q \frac{d}{dt} Q_r = Q_s(V) - Q_d \quad (2.13)$$

$$Q_d = Q_r + Q_t(V)$$

en donde $Q_t(V)$ está definida por la ecuación (2.4), y:

$$Q_d = \frac{EV - V^2}{X} \quad (2.14)$$

Substituyendo (2.14) en (2.13), y resolviendo para el voltaje en terminales en el nodo de carga, se obtiene la ecuación diferencial no lineal:

$$T_q \left[\frac{E}{X} - \frac{2V_o}{X} - \frac{Q_o \beta_t}{V_o} \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_t - 1} \right] \frac{dV}{dt} = Q_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_s} - \left[\frac{EV - V^2}{X} \right] \quad (2.15)$$

con condiciones iniciales

$$Q_o - \left[\frac{EV - V^2}{X} \right] = 0$$

La ecuación (2.15) permite describir el comportamiento del voltaje en terminales del nodo de carga ante un cambio en la condición de operación. A continuación, se analiza la respuesta del sistema ante cambios de operación y se introduce el efecto de la acción de dispositivos de control de voltaje.

2.3.2 Respuesta del sistema ante grandes perturbaciones

Para ilustrar el comportamiento transitorio del sistema, considérese que en $t = 250$ segundos, se desconecta un circuito de transmisión. En la Figura 2.7 se muestra el comportamiento del voltaje en el nodo de carga, considerando diferentes condiciones iniciales de demanda de potencia reactiva, Q_o .

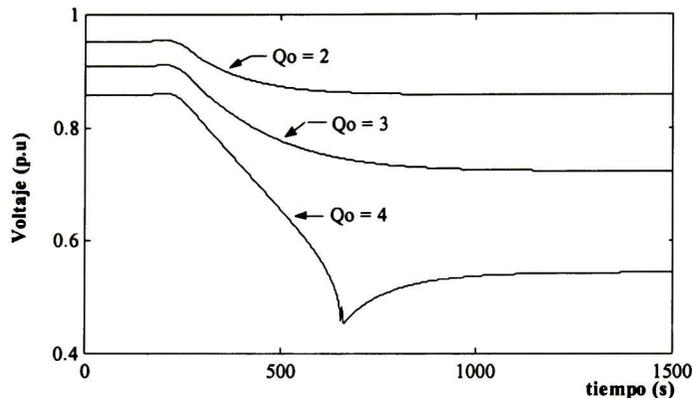


Figura 2.7.- Gráfico de la variación del voltaje en el nodo de carga ante el disparo de una línea de transmisión

Como se observa, la respuesta del sistema está fuertemente determinada por el nivel de demanda en la condición de predisturbio. Conforme el sistema se carga, se reduce la capacidad del nodo generador para proporcionar la potencia reactiva requerida por la demanda y la red de transmisión, conduciendo eventualmente al colapso de voltaje.

En la Figura 2.8 se muestra la respuesta del sistema ante la misma perturbación, cuando se conecta un banco de capacitores de 2.0 p.u en terminales del nodo de carga. Se asume, para propósitos de estudio, que $Q_o = 3$ p.u y se adoptan los mismos parámetros de carga del caso anterior. El análisis muestra que la rapidez en la conexión del dispositivo de control tiene un efecto importante en la capacidad del sistema para mantener la estabilidad de voltaje.

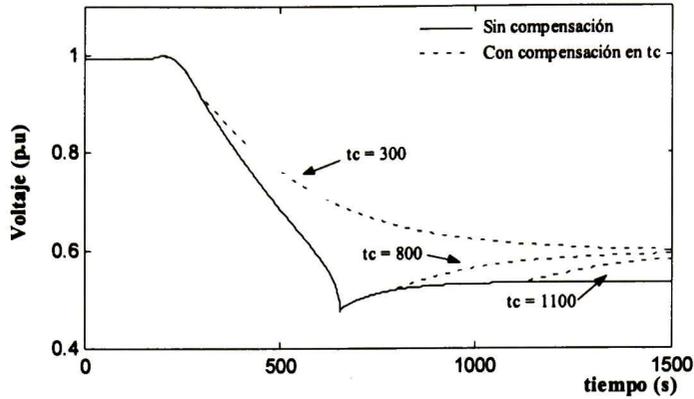


Figura 2.8.- Gráfico de la variación del voltaje en el nodo de carga, considerando diferentes tiempos de conexión del banco de capacitores.

2.3.3 Puntos de equilibrio estables e inestables

El modelo dinámico del sistema de estudio exhibe dos puntos de equilibrio definidos por la relación no lineal

$$Q_o - \frac{EV_o - V_o^2}{X} = 0 \quad (2.16)$$

Resolviendo para la magnitud del voltaje en (2.16), se obtiene la curva característica Q-V definida por la relación no lineal:

$$V = \frac{1}{2}E \pm \sqrt{\frac{1}{4}E^2 - Q_d X} \quad (2.17)$$

En la Figura 2.9 se muestran las curvas Q-V para el sistema y la carga; nótese que la intersección de las curvas (puntos B y D) representa el voltaje de operación en el nodo de carga. La ecuación (2.17) exhibe dos puntos de equilibrio: un punto de operación en la región superior de la curva Q-V (región A-C) y un punto de equilibrio asociado a la operación en la región inferior de la curva (región C-0). Cabe destacar en este análisis que en el punto de máxima cargabilidad, se tiene una solución única caracterizada por las condiciones $V = E/2$ y $Q_d = Q_o = Q_{max} = E^2/4X$.

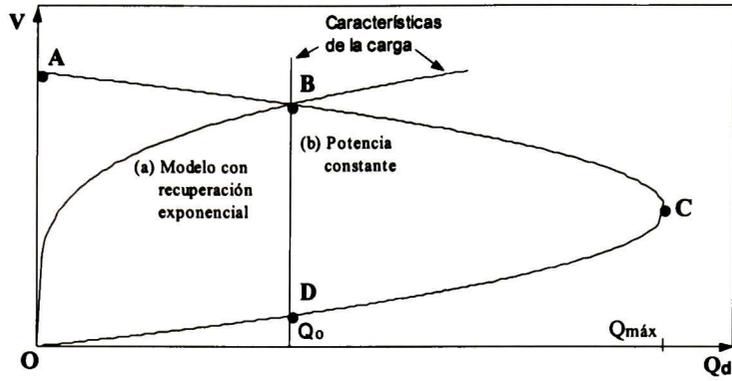


Figura 2.9.- Curva Q-V y características de la carga

Para determinar la naturaleza de los puntos de equilibrio, es necesario calcular los valores propios del sistema para la condición (V_o, Q_o) . Expandiendo las ecuaciones (2.13) y (2.16) alrededor de la condición de equilibrio se obtiene la representación lineal:

$$T_q \left(\Delta Q_d - Q'_t(V) \Delta \dot{V} \right) = Q'_s(V) \Delta V - \Delta Q_d \quad (2.18)$$

en donde

$$Q'_t(V) = \frac{dQ_t(V)}{dV} ; Q'_s(V) = \frac{dQ_s(V)}{dV}$$

y

$$\Delta Q_d = \frac{\partial Q_d}{\partial V} \Delta V = \left[\frac{E - 2V^o}{X} \right] \Delta V \quad (2.19)$$

Substituyendo (2.19) en (2.18) y resolviendo para el voltaje en terminales se obtiene la representación de estado

$$\Delta \dot{V} = A \Delta V$$

donde A es la matriz de estado definida como

$$A = \left[\frac{dQ_d}{dV} - Q'_t(V) \right]^{-1} T_q^{-1} \left[Q'_s(V) - \frac{dQ_d}{dV} \right] = \frac{1}{T_q} \left[\frac{Q_o \beta_s X - EV_o + 2V_o^2}{EV_o - 2V_o^2 - Q_o \beta_t X} \right] \quad (2.20)$$

De este análisis se deduce que el comportamiento del sistema está determinado por un modo real de voltaje caracterizado por el valor propio

$$\lambda_v = -\frac{1}{T_q} \left[\frac{2V_o^2 - EV_o + Q_o\beta_s X}{2V_o^2 - EV_o + Q_o\beta_t X} \right] \quad (2.21)$$

Es inmediato notar que las características de estabilidad del sistema están definidas por la condición inicial de operación, las características de la carga y la robustez del sistema. Para clarificar estos conceptos, en la Tabla 2.1 se muestra el comportamiento del valor propio λ_v para las condiciones extremas de operación; el sistema sin carga ($Q_o=0$) y la condición de máxima cargabilidad, Q_{max} .

Tabla 2.1
Características de estabilidad del modo de voltaje considerando $Q_o = 0$ y $Q_o = Q_{m\acute{a}x}$

Punto de operación	Valor propio	Característica de estabilidad
A	$\lambda_v(Q_o = 0) = -\frac{1}{T_q}$	Estable
C	$\lambda_v(Q_o = Q_{m\acute{a}x}) = -\frac{1}{T_q} \frac{\beta_s}{\beta_t}$	Estable

Del análisis anterior se deduce, que la magnitud del valor propio en el punto de colapso de voltaje podrá ser mayor o menor que el valor propio para la condición sin carga dependiendo de la relación β_s/β_t . Un razonamiento análogo permite, por otro lado, determinar que el caso crítico de operación corresponde a un comportamiento de la carga con una característica de potencia constante ($\beta_s=0$).

En el caso más general, sin embargo, la estabilidad del sistema está determinada por el comportamiento relativo de las condiciones:

$$Q_o\beta_s X + 2V_a^2 - EV_a$$

y

$$Q_o\beta_t X + 2V_a^2 - EV_a$$

las cuales corresponden al numerador y denominador de la ecuación (2.21). Se puede observar que el sistema será inestable ($\lambda_v > 0$) cuando cualquiera de estas relaciones sea negativa.

En la Tabla 2.2, se resumen las diferentes condiciones de operación encontradas para la parte superior e inferior de la curva Q-V, en función de los parámetros del sistema.

Tabla 2.2
Características de estabilidad del sistema en estudio

Región de operación		Signo ($2V_o^2 - EV_o$)	λ_v	Característica de estabilidad
A - C ⁽⁻⁾		+		Estable
C		0		Estable
C - D	$ 2V_o^2 - EV_o < Q_o\beta_t X $			Estable
	$ 2V_o^2 - EV_o > Q_o\beta_t X $		+	Inestable
	$ 2V_o^2 - EV_o < Q_o\beta_s X $			Estable
	$ 2V_o^2 - EV_o > Q_o\beta_s X $		+	Inestable

El análisis de estos resultados muestra que es posible tener una condición de operación estable en la parte inferior de la curva Q-V; esta condición estará determinada por el punto de operación, las características transitoria y de estado estable de la carga y el nivel de cortocircuito en el nodo de carga.

Para ilustrar estos conceptos, considérese que $\beta_s < \beta_t$; entonces $Q_o\beta_t X > Q_o\beta_s X$ y la estabilidad del sistema está determinada por la relación $Q_o\beta_s X + 2V_o^2 - EV_o$. El límite de estabilidad del sistema ($\lambda_v = 0$) estará dado por la condición

$$Q_o\beta_s X + 2V_o^2 - EV_o = 0 \quad (2.22)$$

de donde

$$Q_o^{max} = -\frac{E^2(\beta_s - 1)}{X(\beta_s - 2)^2} \quad \text{para } \beta_s < \beta_t \quad (2.23)$$

Si se considera ahora que $\beta_s > \beta_t$, el límite de estabilidad estará determinado por la relación $Q_o\beta_t X + 2V_o^2 - EV_o = 0$. En este caso se puede mostrar que:

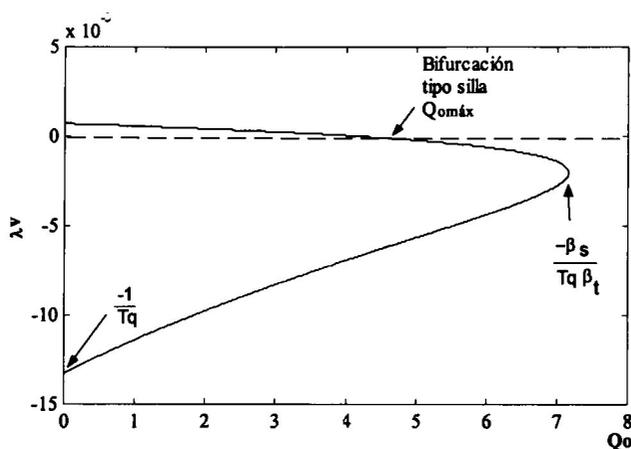
$$Q_o^{max} = -\frac{E^2(\beta_t - 1)}{X(\beta_t - 2)^2} \quad \text{para } \beta_s > \beta_t \quad (2.24)$$

Este caso resulta de particular interés, ya que en el límite de estabilidad, $\lambda_v \rightarrow -\infty$ mostrando la presencia de una bifurcación tipo singular inducida en el modo de voltaje [24].

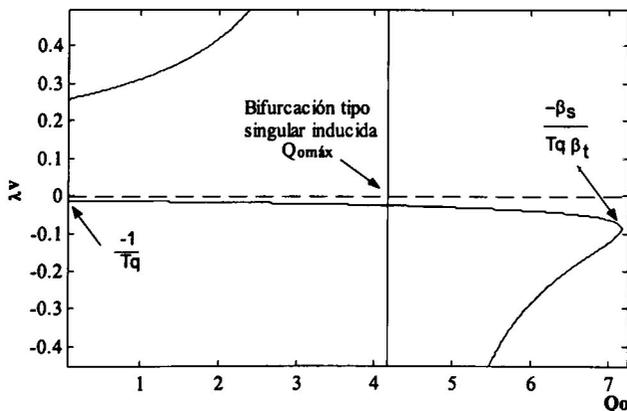
En la Figura 2.10, se muestra gráficamente el comportamiento del eigenvalor λ_V para dos condiciones de operación consideradas: a) $\beta_s < \beta_t$, y b) $\beta_s > \beta_t$. Los parámetros utilizados en el estudio se pueden ver en la Tabla 2.3. En el caso 2, el sistema exhibe una bifurcación tipo singular inducida cuando se opera en condiciones de carga considerable: en esta condición, el modo de voltaje cambia abruptamente de un valor negativo (estable) a un valor positivo (inestable).

Tabla 2.3
Parámetros para el ejemplo utilizado

Caso 1	Caso 2
$X = 0.037$	$X = 0.037$
$T_q = 75.3$	$T_q = 75.3$
$\beta_s = 0.75$	$\beta_s = 5.22$
$\beta_t = 5.22$	$\beta_t = 0.75$



Caso 1. $\beta_s < \beta_t$



Caso 2. $\beta_s > \beta_t$

Figura 2.10.- Comportamiento del modo de voltaje λ_V ante incrementos en Q_d

En el caso 2, el eigenvalor λ_V en el límite de estabilidad tiende a $-\infty$ y posteriormente aparece con un valor muy grande y positivo. Lo anterior está de acuerdo con lo desarrollado anteriormente.

2.4 EFECTO DE LA ACCIÓN DE DISPOSITIVOS DE CONTROL EN EL MARGEN DE ESTABILIDAD

La acción de control en nodos estratégicos del sistema puede mejorar en forma importante los márgenes de estabilidad del sistema. En esta sección, se analiza la influencia de dispositivos de control de voltaje en el problema de estabilidad de voltaje ante disturbios pequeños.

Considérese, con este objetivo, que se instala un dispositivo de control de voltaje en terminales del nodo de carga y se asumen las mismas condiciones de modelado descritas anteriormente.

2.4.1 Margen de estabilidad de estado estable

En estado estable, el comportamiento del sistema esta descrito por las relaciones:

$$Q_d = Q_{línea} - Q_{shunt} \quad (2.25)$$

donde $Q_{línea}$ representa la aportación de potencia reactiva del sistema definida como

$$Q_{línea} = \frac{EV - V^2}{X} \quad (2.26)$$

y

$$Q_{shunt} = VI_{shunt} \quad (2.27)$$

representa la contribución potencia reactiva del dispositivo de control.

Substituyendo las relaciones (2.27) y (2.26) en (2.25), y resolviendo para el voltaje en terminales se obtiene que:

$$V = \frac{E + XI_{shunt}}{2} \pm \sqrt{\frac{(E + XI_{shunt})^2}{4} - Q_d X} \quad (2.28)$$

En general, la corriente demandada por el dispositivo, I_{shunt} , es una función de la estrategia de control utilizada. En estado estable, este comportamiento está definido por la curva característica V-I: para el estudio de estabilidad de voltaje, la región de interés corresponde a la región de operación capacitiva, y más concretamente, a la zona de operación de voltaje bajo.

En la Figura 2.11, se muestran curvas características de operación para los dispositivos típicos de control de voltaje, considerados en este trabajo.

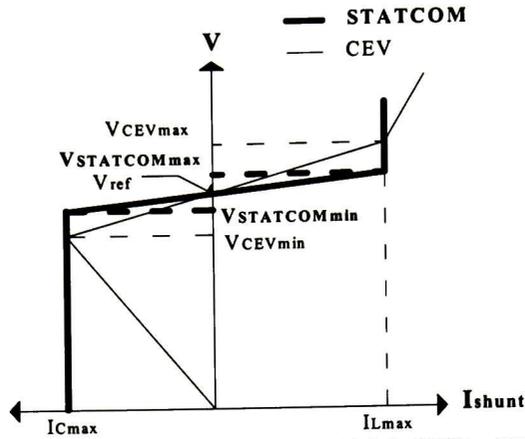


Figura 2.11.- Curvas características V-I del CEV y STATCOM

Para los dispositivos de control considerados en este estudio, esta característica puede expresarse como:

$$I_{shunt} = \begin{cases} \frac{E}{2X_c - X} & \text{para el capacitor} \\ I_{Cmax} & \text{para el STATCOM} \\ \beta_{max} V & \text{para el CEV} \end{cases}$$

Siguiendo un proceso de deducción análogo al caso sin control, el punto de máxima cargabilidad del sistema estará dado por la relación

$$Q_{max} = \frac{(E + XI_{shunt})^2}{4X} \quad (2.29)$$

Se muestra, además, que el aumento en el margen de estabilidad en estado estable es función del cuadrado de la corriente aportada por el dispositivo de control; este análisis enfatiza la importancia de mantener una contribución importante de potencia reactiva bajo condiciones de operación de voltaje bajo.

2.4.2 Características de estabilidad del sistema con compensación en paralelo

Con objeto de evaluar el efecto de la aplicación de un dispositivo de control en el margen de estabilidad ante disturbios pequeños, considérese que el comportamiento dinámico del dispositivo de control se representa mediante el modelo simplificado

$$\Delta \dot{\beta}_{shunt} = \frac{K}{T} \Delta V - \frac{1}{T} \Delta \beta \quad (2.30)$$

en donde β_{shunt} representa la susceptancia instantánea del dispositivo y la potencia reactiva proporcionada por el dispositivo de control será $Q_{shunt} = V^2 \beta_{shunt}$.

Por consiguiente, el balance de potencia reactiva en el nodo de carga puede expresarse como

$$\Delta Q_d = \left(\frac{E - 2V}{x} + 2V\beta_{shunt} \right) \Delta V + V^2 \Delta \beta_{shunt} \quad (2.31)$$

Si se define el vector de estados del sistema como $\mathbf{x} = [V, \beta]^T$ se obtiene la representación de estado

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{V} \\ \Delta \dot{\beta}_{shunt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \beta_{shunt} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

en donde:

$$a_{11} = - \frac{(\beta_s Q_o X T - E V_o T + 2V_o^2 T - 2V_o^2 \beta_{shunt} X T + T_q V_o^3 K X)}{T T_q (\beta_t Q_o X - E V_o + 2V_o^2 - 2V_o^2 \beta_{shunt} X)}$$

$$a_{21} = \frac{K}{T}$$

$$a_{12} = \frac{V_o^3 X (T_q - T)}{T T_q (V_o E - 2V_o^2 + 2V_o^2 \beta - \beta_t Q_o T_q X)}$$

$$a_{22} = -\frac{1}{T}$$

El comportamiento del sistema está caracterizado por dos modos de estabilidad, un modo de voltaje y un modo asociado a la acción de control del dispositivo de compensación. Es de destacar también que el acoplamiento entre estos modos está relacionado a la acción de control del compensador y las características de la carga, dado que en general $T_q \gg T$ y $K > 0$.

Se presentan a continuación, diversos estudios orientados a la determinación del efecto de dispositivos de control en los márgenes de estabilidad ante disturbios pequeños. Los parámetros utilizados en el estudio se resumen en la Tabla 2.4.

El procedimiento adoptado de análisis comprende los siguientes pasos:

1. La carga del sistema se aumentó en pasos discretos de magnitud constante. En cada punto de operación se calculó el voltaje en terminales, V , mediante un estudio de flujo de potencia.
2. Para cada condición de operación, se calcularon los valores propios del sistema.

Tabla 2.4
Parámetros utilizados para el sistema en estudio

Sistema	Carga	Capacitor	CEV / STATCOM [25]
E = 1.03 X = 0.037	$T_q = 75.3$ $\beta_s = 0.75$ $\beta_t = 5.22$	$Q_{nominal} = 0.4$	K = 33 T = 0.05 $V_{ref} = 1.0$ $Q_{Cmax} = 0.65$ $Q_{Lmax} = 0.3$

En la Figura 2.12, se presentan las curvas Q-V del sistema para tres alternativas de control: un banco de capacitores, un CEV y un STATCOM. Nótese que se consideran características similares de operación.

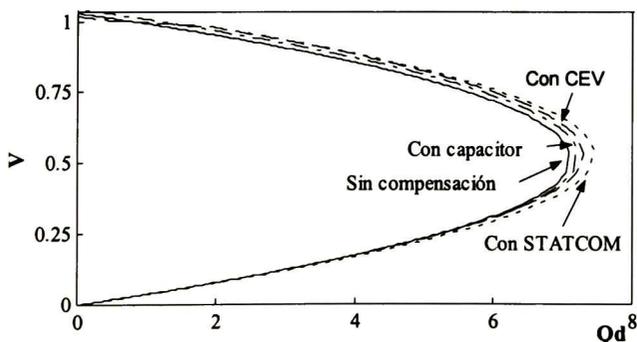


Figura 2.12.- Curvas Q-V del sistema carga – bus infinito considerando diferentes dispositivos de compensación

Como se observa, el control de voltaje permite aumentar la condición de máxima cargabilidad del sistema. Se muestra que al mantener un mayor valor de potencia reactiva, es posible aumentar adicionalmente el margen de estabilidad.

Por último, en la Figura 2.13 se muestra el comportamiento del valor propio asociado al modo de voltaje para las tres alternativas de control consideradas. Como se muestra, el control del voltaje permite obtener un aumento significativo en el margen de estabilidad del sistema. Además es posible extender el rango de operación estable bajo la curva Q-V como se muestra en la misma figura.

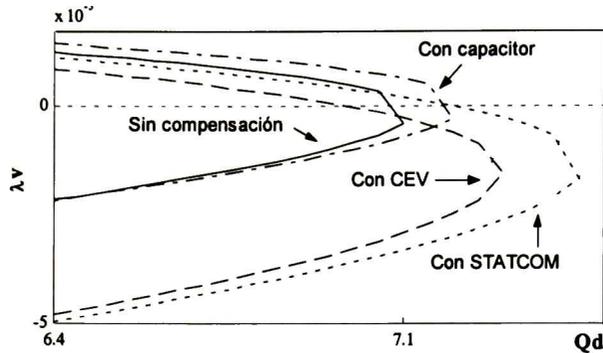


Figura 2.13.- Valores propios asociados a voltaje.

En el presente capítulo se ha mostrado para un sistema simple que cuando la carga es representada mediante el modelo de recuperación exponencial el límite de estabilidad esta asociado a una bifurcación en un valor propio, la cual puede ser de tipo silla o singular inducida. Esto, dependera de los coeficientes transitorios y d estado estable de la carga. Asimismo, se ha demostrado la existencia de zonas bajo la nariz de la curva Q-V detectadas como estables. En el siguiente capítulo se extiende el análisis desarrollado a redes multinodales, se muestra que, en general, las conclusiones obtenidas en el presente capítulo son validas para sistemas multinodos.

MODELADO DEL SISTEMA DE POTENCIA

3.1 INTRODUCCIÓN

La importancia de un modelo adecuado del sistema de potencia para el estudio de la estabilidad de voltaje ha sido extensamente reconocida en la literatura [12,14,26]. Debido a la complejidad del fenómeno en estudio, sin embargo, resulta de interés práctico desarrollar modelos simplificados del sistema de potencia que permitan una evaluación preliminar de los principales factores que propician su aparición y el desarrollo de medidas correctivas. En el presente capítulo, se propone un modelo lineal del sistema de potencia para estudios de estabilidad de voltaje de mediano y largo plazo basado en la representación dinámica de la carga y el modelado de dispositivos de control de voltaje.

El modelo propuesto parte de la integración de un modelo genérico de carga en las ecuaciones modificadas de flujos de potencia en estado estable del sistema y constituye una extensión de los modelos básicos presentados en el capítulo anterior. Este modelo está basado en la noción práctica de que el comportamiento dinámico de los generadores y sus dispositivos de control es muy rápido con relación al comportamiento propuesto de la carga. Con base en esta formulación, se propone una interpretación física del modelo derivado y se deducen medidas analíticas de la distancia del sistema a la inestabilidad de voltaje, y la evaluación del efecto de la acción de dispositivos de control en la red de transmisión.

El capítulo está estructurado de la siguiente manera. Se introduce, en primer lugar, la estructura del modelo genérico adoptado de la carga y se describe el modelo adoptado de la red de transmisión. Se distinguen, a continuación, dos perspectivas diferentes de modelado del sistema de potencia: la primera está basada en la adopción de los voltajes en terminales de los nodos de carga como variables de estado; la segunda permite expresar el comportamiento de la carga mediante un modelo de estado. A continuación, se establecen comparaciones entre los dos modelos y se discute su aplicación en el contexto del estudio de estabilidad de voltaje en sistemas complejos. Por último, se discute brevemente la naturaleza de los algoritmos computacionales desarrollados.

3.2 ESTRUCTURA DEL MODELO PSEUDO-DINÁMICO DEL SISTEMA

El modelo de estado del sistema se construye a partir de las representaciones individuales de la carga y los dispositivos de control. Dos opciones son posibles en esta representación. En la primera de ellas, los voltajes en los nodos de carga se adoptan como variables de estado; en la segunda, la potencia de recuperación de la carga puede representarse en la forma convencional de estado.

En los apartados siguientes se discute la naturaleza de estos modelos y se presentan, paralelamente, las aproximaciones adoptadas en este trabajo.

3.2.1 Modelado dinámico de la carga

Considérese un sistema general compuesto de n nodos: en este modelo, nl nodos representan a las cargas que exhiben un comportamiento descrito por un modelo dinámico y ng nodos describen a los generadores del sistema. La carga se representa mediante un modelo genérico de la forma

$$T_{p^k} \Delta \dot{P}_{r^k} = P_{s^k}'(V_k) \Delta V_k - \Delta P_{d^k} \quad (3.1)$$

$$T_{q^k} \Delta \dot{Q}_{r^k} = Q_{s^k}'(V_k) \Delta V_k - \Delta Q_{d^k} \quad (3.2)$$

donde

$$\Delta P_{d^k} = \Delta P_{r^k} + P_{t^k}'(V_k) \Delta V_k \quad (3.3)$$

$$\Delta Q_{d^k} = \Delta Q_{r^k} + Q_{t^k}'(V_k) \Delta V_k \quad (3.4)$$

y

$$\begin{aligned} P_{s^k} &= P_o \left(\frac{V}{V_{k^o}} \right)^{\alpha_{s^k}} \\ P_{t^k} &= P_o \left(\frac{V}{V_{k^o}} \right)^{\alpha_{t^k}} \\ Q_{s^k} &= Q_o \left(\frac{V}{V_{k^o}} \right)^{\beta_{s^k}} \\ Q_{t^k} &= Q_o \left(\frac{V}{V_{k^o}} \right)^{\beta_{t^k}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

para $k = 1, \dots, nl$.

Resolviendo para la potencia de recuperación ΔP_r y ΔQ_r en las ecuaciones (3.3) y (3.4) y sustituyendo estas expresiones en las ecuaciones (3.1) y (3.2), se obtiene:

$$T_{p^k} \left(\Delta P_{d^k} - P_{t^k}'(V_k) \Delta \dot{V}_k \right) = P_{s^k}'(V_k) \Delta V_k - \Delta P_{d^k} \quad (3.6)$$

y

$$T_{qk} \left(\Delta Q_{dk} - Q'_{tk}(V_k) \Delta \dot{V}_k \right) = Q'_{sk}(V_k) \Delta V_k - \Delta Q_{dk} \quad (3.7)$$

En la Figura 3.1. se muestra la representación en diagrama de bloques del modelo de la carga, ilustrando las relaciones entrada-salida. La naturaleza de este modelo permite diversas formulaciones de las ecuaciones del sistema como se discute posteriormente.

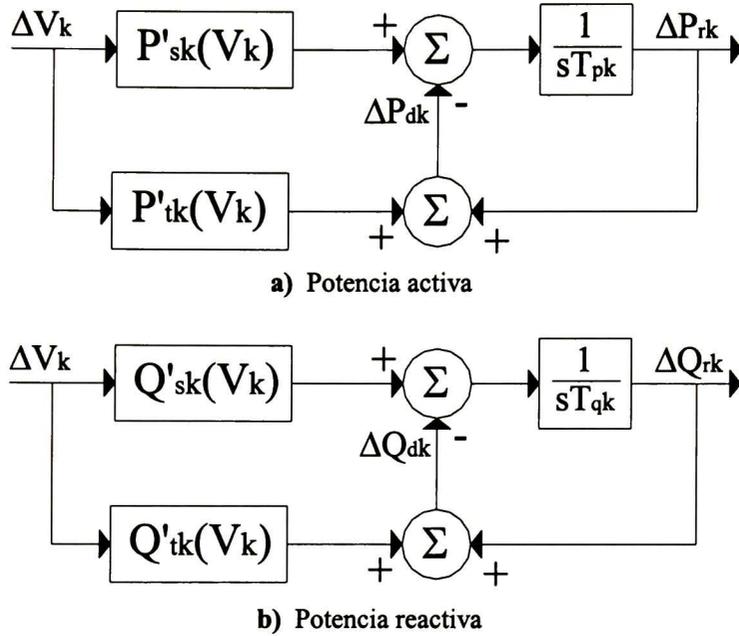


Figura 3.1.- Representación esquemática del modelo de la carga

La generalización de este modelo para un conjunto de nl nodos de carga es inmediata: expresando las ecuaciones (3.6) y (3.7) en forma matricial se obtiene la representación parcial de estado

$$\mathbf{DT} \left(\Delta \dot{\mathbf{S}}_d - \mathbf{NN}_v \Delta \dot{\mathbf{U}}_v \right) = \mathbf{MM}_v \Delta \mathbf{U}_v - \Delta \mathbf{S}_d \quad (3.8)$$

en donde

$$\mathbf{DT} = \text{diag} \left(T_{p^1}, \dots, T_{p^{nl}}, T_{q^1}, \dots, T_{q^{nl}} \right)$$

$$\Delta \mathbf{S}_d = \left[\Delta P_{d^1}, \dots, \Delta P_{d^{nl}}, \Delta Q_{d^1}, \dots, \Delta Q_{d^{nl}} \right]^T$$

$$\Delta \mathbf{U}_v = [\Delta V_{d1}, \dots, \Delta V_{dnl}]^T$$

y

$$\mathbf{NN}_v = \begin{bmatrix} \text{diag}(P'_{t1}, \dots, P'_{tnl}) \\ \text{diag}(Q'_{t1}, \dots, Q'_{tnl}) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{MM}_v = \begin{bmatrix} \text{diag}(P'_{s1}, \dots, P'_{snl}) \\ \text{diag}(Q'_{s1}, \dots, Q'_{snl}) \end{bmatrix}$$

A continuación, se establecen los criterios adoptados para integrar las ecuaciones de la carga al modelo global del sistema de potencia y se aborda el problema de modelado de dispositivos de control.

3.2.2 Modelado de la red de transmisión

En estudios de estabilidad de voltaje de mediano y largo plazo, la red de transmisión se representa convencionalmente mediante las ecuaciones de flujos de potencia como

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{S}_d \\ \Delta \mathbf{S}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{S}_d}{\partial \mathbf{U}} & \frac{\partial \mathbf{S}_d}{\partial \mathbf{U}_g} \\ \frac{\partial \mathbf{S}_g}{\partial \mathbf{U}} & \frac{\partial \mathbf{S}_g}{\partial \mathbf{U}_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U} \\ \Delta \mathbf{U}_g \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

en donde las submatrices en (3.9) son elementos de la matriz Jacobiana de flujos de potencia, y

$$\Delta \mathbf{S}_g = [\Delta P_{g1}, \dots, \Delta P_{g^{ng}}, \Delta Q_{g1}, \dots, \Delta Q_{g^{ng}}]^T$$

$$\Delta \mathbf{U}_g = [\Delta \theta_{g1}, \dots, \Delta \theta_{g^{ng}}, \Delta V_{g1}, \dots, \Delta V_{g^{ng}}]^T$$

$$\Delta \mathbf{U} = [\Delta \theta_{d1}, \dots, \Delta \theta_{dnl}, \Delta V_{d1}, \dots, \Delta V_{dnl}]^T$$

donde ng es el número de nodos de generación.

Una primera aproximación de interés práctico al estudio de estabilidad de voltaje de mediano y largo plazo, se obtiene al asumir que el comportamiento dinámico de los generadores y sus controles de excitación es rápido, comparado con el comportamiento de la carga. Con estas consideraciones se obtiene que [15,18]:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{ga}, \dots, \Delta V_{gng} \end{bmatrix} = 0$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_{ga}, \dots, \Delta \theta_{gng} \end{bmatrix} = 0$$

Por consiguiente, las magnitudes y ángulos de los nodos de generación pueden ser eliminados de la ecuación (3.9), resultando en el modelo simplificado

$$\Delta S_d = J \Delta U \quad (3.10)$$

en donde $J(nl \times nl)$ es la matriz Jacobiana de flujos de potencia para los nodos de carga. A partir de este modelo, se deducen dos modelos dinámicos del sistema de potencia para estudios de estabilidad de voltaje: un modelo dinámico basado en la variación de voltajes y un modelo basado en el comportamiento dinámico de la carga.

3.3 MODELO PSEUDO-DINÁMICO DEL SISTEMA: FORMULACIÓN BASADA EN EL ESTUDIO DE VOLTAJES NODALES

3.3.1 Representación parcial de estado

En esta representación, la magnitud y fase de los voltajes en terminales de la carga se adoptan como variables de estado. Considérese, con este propósito, que se define el vector de estado $\Delta U = [\Delta \theta_{d1}, \dots, \Delta \theta_{dnl}, \Delta V_{d1}, \dots, \Delta V_{dnl}]^T$. El modelo dinámico de la carga puede entonces expresarse en la forma aumentada

$$DT \left(\Delta \dot{S}_d - NN \Delta \dot{U} \right) = MM \Delta U - \Delta S_d \quad (3.11)$$

en donde

$$NN = [0(2nl \times nl), NN_v]$$

$$MM = [0(2nl \times nl), MM_v]$$

Substituyendo (3.10) en (3.11) se obtiene el modelo dinámico incremental:

$$DT \left(J \Delta \dot{U} - NN \Delta \dot{U} \right) = MM \Delta U - J \Delta U \quad (3.12)$$

o, equivalentemente

$$\Delta \dot{U} = A \Delta U \quad (3.13)$$

donde **A** es la matriz de estado definida como

$$A = (J - NN)^{-1} (DT)^{-1} (MM - J) \quad (3.14)$$

El análisis de este modelo permite establecer que:

- La matriz de estado es asimétrica. El grado de asimetría de esta matriz está determinado esencialmente por las matrices **NN** y **MM**.
- Cabe destacar que en el caso particular en que la carga se representa con una característica de potencia constante en los períodos transitorios y de estado estable (**NN=MM**)=**diag(0)**, el sistema será siempre estable con valores propios definidos por la relación

$$\lambda_v = \left[-\frac{1}{T_{p^1}} \dots -\frac{1}{T_{p^{nl}}} -\frac{1}{T_{q^1}} -\frac{1}{T_{q^{nl}}} \right]^T$$

En la Figura 3.2 se muestra una interpretación gráfica de este modelo, ilustrando la representación de las variables intermedias asociadas a la potencia de recuperación de la carga.

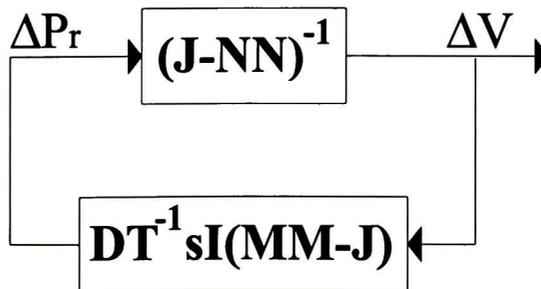


Figura 3.2.- Representación en diagrama de bloques del modelo de estado del sistema

Obsérvese que en la formulación propuesta, el modelo de estado se obtiene de manera directa como el producto de tres matrices; una limitación importante de este modelo es la incapacidad de permitir un análisis eficiente de cada una de estas matrices. Debido a las razones anteriores, se propone en los apartados siguientes una formulación alterna a este modelo básico.

3.3.2 Características de estabilidad del sistema

La matriz de estado en (3.14) es densa, asimétrica y sin una estructura específica que permita determinar la naturaleza del fenómeno de estabilidad así como el análisis de los factores que propician su desarrollo. Se presenta, a continuación, un análisis de las características esenciales del modelo propuesto y se deducen medidas prácticas de la cercanía a la inestabilidad de voltaje.

Considere, con este propósito, que el determinante del sistema en (3.14) se expresa en la forma

$$\det(\mathbf{A}) = \prod_{i=1}^{2nl} \lambda_i = \frac{1}{\det(\mathbf{DT})} \cdot \frac{\det(\mathbf{MM} - \mathbf{J})}{\det(\mathbf{J} - \mathbf{NN})} \quad (3.15)$$

En la expresión anterior se puede concluir que, debido al número par de valores propios, el sistema será estable (todos los valores propios negativos) si el $\det(\mathbf{A}) > 0$; el mismo análisis permite establecer que en la vecindad del punto de colapso, el modo crítico cambia de signo y, por consiguiente, el determinante será menor que cero. Esta condición puede utilizarse como una medida práctica de la cercanía a la inestabilidad.

Si se considera que el $\det(\mathbf{DT})$ es constante y positivo, el cambio de signo de $\det(\mathbf{A})$ estará determinado por un cambio de signo en alguna de las relaciones $\det(\mathbf{MM} - \mathbf{J})$ ó $\det(\mathbf{J} - \mathbf{NN})$, las cuales dependen de los parámetros de la carga y la condición de operación del sistema.

En el límite de estabilidad, una de las relaciones $\det(\mathbf{MM} - \mathbf{J})$ ó $\det(\mathbf{J} - \mathbf{NN})$ es igual a cero. Para clarificar estos conceptos, considere primeramente que el $\det(\mathbf{MM} - \mathbf{J}) = 0$. Al sustituir esta condición en la ecuación (3.15) se tiene

$$\det(\mathbf{A}) = \prod_{i=1}^{2nl} \lambda_i = 0 \quad \text{si } \det(\mathbf{MM} - \mathbf{J}) = 0 \quad (3.16)$$

La expresión (3.16) indica que cuando el determinante $\det(\mathbf{MM} - \mathbf{J}) = 0$ existe al menos un $\lambda = 0$, tal que $\prod_{i=1}^{2nl} \lambda_i = 0$. Lo cual muestra la presencia de una bifurcación tipo silla.

Suponga ahora que el $\det(\mathbf{J}-\mathbf{NN})=0$; en este caso, el determinante de la matriz \mathbf{A} puede expresarse como

$$\det(\mathbf{A}) = \prod_{i=1}^{2n} \lambda_i = \infty \quad \text{si } \det(\mathbf{J} - \mathbf{NN}) = 0 \quad (3.17)$$

Se puede deducir que en este caso uno de los valores propios tomará un valor infinito, $\lambda \rightarrow -\infty$, indicando la presencia de una bifurcación singular inducida en el valor propio.

Con la finalidad de clarificar los conceptos desarrollados anteriormente considere el sistema simple de potencia en la Figura 3.3.

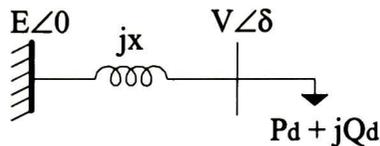


Figura 3.3.- Sistema bus infinito – carga

El modelo de estado del sistema esta definido por las relaciones (3.13) y (3.14), en donde

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{X} \begin{bmatrix} VE \cos \delta & E \sin \delta \\ -VE \sin \delta & E \cos \delta - 2V \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{NN} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha_t \frac{P_o}{V_o} \\ 0 & \beta_t \frac{Q_o}{V_o} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{MM} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha_s \frac{P_o}{V_o} \\ 0 & \beta_s \frac{Q_o}{V_o} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{DT} = \begin{bmatrix} T_p & 0 \\ 0 & T_q \end{bmatrix}$$

Se puede mostrar que para el sistema en estudio:

$$\det(\mathbf{J} - \mathbf{NN}) = \det(\mathbf{J}) + k_2\alpha_t - k_1\beta_t \quad (3.18)$$

$$\det(\mathbf{MM} - \mathbf{J}) = \det(\mathbf{J}) + k_2\alpha_s - k_1\beta_s \quad (3.19)$$

donde

$$k_1 = J_{11} \frac{Q_o}{V_o} \quad k_1 \geq 0$$

$$k_2 = J_{21} \frac{P_o}{V_o} \quad k_2 \leq 0$$

De lo anterior, se desprende que el determinante $\det(\mathbf{J}-\mathbf{NN})$ está afectado por los parámetros de la carga en estado transitorio (α_t, β_t) , mientras que el determinante $\det(\mathbf{MM}-\mathbf{J})$ es función de las constantes de estado estable (α_s, β_s) . En el límite de estabilidad, el comportamiento del sistema estará determinado por una de las dos relaciones:

$$\det(\mathbf{J}-\mathbf{NN})=0$$

ó

$$\det(\mathbf{MM}-\mathbf{J})=0$$

Al considerar que $\det(\mathbf{J}) \geq 0$ y las definiciones de las constantes k_1 y k_2 , se puede concluir que en el caso en el cual $\beta_t > \beta_s$ y $\alpha_t > \alpha_s$, el $\det(\mathbf{J}-\mathbf{NN})$ será el que determine el límite de estabilidad.

De manera análoga, se puede mostrar que en el caso particular en el que $\beta_s > \beta_t$ y $\alpha_s > \alpha_t$ el límite de estabilidad estará determinado por el $\det(\mathbf{MM}-\mathbf{J})$. Es decir, el límite de estabilidad está determinado por los parámetros de la carga de estado estable y transitorio; es importante señalar que las constantes de tiempo T_p y T_q no tienen ningún efecto sobre el límite de estabilidad.

La importancia práctica de estas conclusiones se discute con mayor amplitud en el capítulo 4 de este trabajo.

3.3.3 Representación de dispositivos de control de voltaje

Para representar la operación de dispositivos de control en paralelo, y más concretamente CEV y STATCOM, se adopta una metodología común de modelado. El modelo propuesto consiste de dos partes; la representación del lazo de control y la interacción con el sistema de potencia. En la siguiente sección se describe con mayor amplitud la naturaleza del modelo adoptado.

3.3.3.1 Modelo dinámico

En la Figura 3.4 se presenta un modelo genérico básico del STATCOM utilizado en los modelos desarrollados en esta tesis. La señal de salida del dispositivo es la susceptancia de control y las señales de entrada son la magnitud del voltaje en terminales y la corriente ponderada del dispositivo. El regulador de voltaje se representa mediante un bloque atraso adelante y una ganancia ajustable. Mediante consideraciones apropiadas, el modelo de control permite representar a un CEV.

La Figura 3.5 muestra la característica de control asociada al comportamiento en estado estable del STATCOM. Obsérvese que los límites en la corriente de salida definen el comportamiento en las zonas de operación de bajo y sobrevoltaje definidos por I_{cmax} e I_{Lmax} .

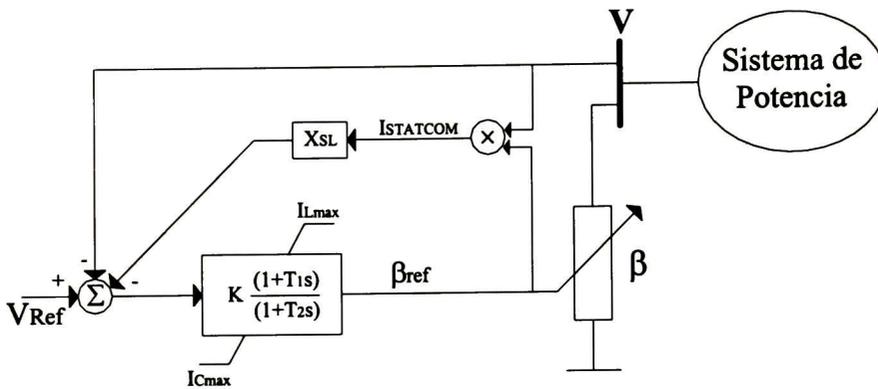


Figura 3.4.- Modelo dinámico del STATCOM

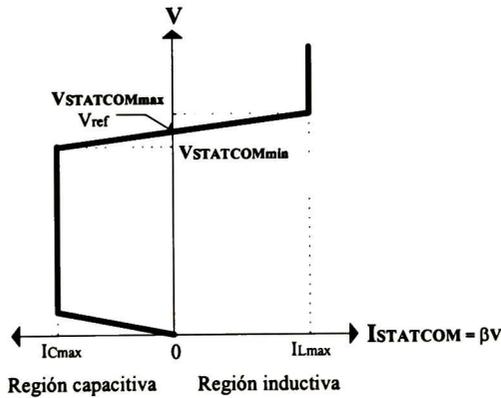


Figura 3.5.- Característica en estado estable del STATCOM

Para ilustrar la naturaleza del modelo propuesto, considérese por simplicidad, que el comportamiento dinámico de cada dispositivo se expresa en la forma [25,27]:

$$\dot{\beta}_k = \frac{K_k}{T_k} \left(V_k - V_{ref}^k \right) - \frac{1}{T_k} \beta_k \quad (3.20)$$

en donde V es la magnitud de voltaje en terminales, V_{ref} es el voltaje de referencia y β es la susceptancia del compensador; la ganancia K y la constante de tiempo T describen la representación del lazo de control.

Expandiendo (3.20) alrededor de la condición de equilibrio y asumiendo la presencia de nc dispositivos de control en nodos de carga del sistema, se obtiene la representación parcial de estado

$$\Delta \dot{\beta} = \mathbf{T}_{cev}^{-1} \Delta \beta + \mathbf{K}_{cev} \mathbf{T}_{cev}^{-1} \Delta \mathbf{U}_v + \mathbf{K}_{cev} \mathbf{T}_{cev}^{-1} \Delta \mathbf{V}_{ref} \quad (3.21)$$

en donde β es el subvector de estado asociado a las susceptancias de salida del dispositivo de control, \mathbf{U}_v es el vector de magnitudes de voltaje en los nodos con compensación, y

$$\mathbf{V}_{ref} = \begin{bmatrix} V_{ref1} & V_{ref2} & \cdots & V_{refnc} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_{cev} = \text{diag}[k_1, k_2, \dots, k_{nc}]$$

$$\mathbf{T}_{cev} = \text{diag} \left[-\frac{1}{T_1}, -\frac{1}{T_2}, \dots, -\frac{1}{T_{nc}} \right]$$

Este modelo interactúa con la representación de la red de transmisión a través de los voltajes nodales y la susceptancia de salida como se explica a continuación.

3.3.3.2 Ecuaciones modificadas de flujo de potencia

La interacción de la carga con la representación del modelo dinámico de los dispositivos de control se obtiene de las ecuaciones estáticas de la red de transmisión. Si se asume que cada dispositivo de control se representa como una fuente controlable de potencia reactiva como se ilustra en la Figura 3.4, el balance de potencia en cada nodo de carga puede entonces expresarse como:

$$\Delta P_k = \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_k}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_k}{\partial V_j} \Delta V_j \quad (3.22)$$

$$\Delta Q_k = \sum_{j=1}^n \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial Q_k}{\partial V_j} \Delta V_j + \frac{\partial Q_k}{\partial \beta_k} \Delta \beta_k$$

para $k=1, \dots, nl$. Siguiendo un proceso de deducción similar al análisis básico descrito anteriormente, la matriz Jacobiana de flujos de potencia para los nodos de carga puede expresarse en forma compacta como

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_d \\ \Delta \mathbf{Q}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{V}} & \mathbf{0} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \mathbf{V} \\ \Delta \beta \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

en donde $\Delta \beta = [\Delta \beta_1, \dots, \Delta \beta_{nc}]^T$. La inclusión de estas ecuaciones en el modelo dinámico de la carga y la representación de los dispositivos de control permite obtener la representación de estado del sistema.

3.3.4 Modelo global de estado

El modelo completo del sistema se obtiene al integrar los modelos dinámico de la carga y dispositivos de control. Para esto, se define el vector de estado como:

$$\Delta \mathbf{x} = [\Delta \theta_{d^1}, \dots, \Delta \theta_{d^{nl}}, \Delta V_{d^1}, \dots, \Delta V_{d^{nl}}, \Delta \beta_1, \dots, \Delta \beta_{nc}]^T$$

Expandiendo la relación (3.11) para incluir los estados asociados a las susceptancias de los compensadores, y substituyendo (3.21), se obtiene la representación parcial de estado:

$$\mathbf{D}\mathbf{T}_{cev} \left(\mathbf{J}_{cev} \Delta \dot{\mathbf{x}} - \mathbf{N}\mathbf{N}_{cev} \Delta \dot{\mathbf{x}} \right) = \mathbf{M}\mathbf{M}_{cev} \Delta \mathbf{x} - \mathbf{H} \mathbf{J}_{cev} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}_{cev} \Delta \mathbf{V}_{ref} \quad (3.24)$$

donde

$$\mathbf{D}\mathbf{T}_{cev} = \begin{bmatrix} \text{diag}(T_{p^1}, \dots, T_{p^{nl}}) & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \text{diag}(T_{q^1}, \dots, T_{q^{nl}}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}(nc \times nc) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{cev} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{V}} & \mathbf{0} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \beta} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}(nc \times nc) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{N}\mathbf{N}_{cev} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \text{diag}(P'_{t1}, \dots, P'_{tnl}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \text{diag}(Q'_{t1}, \dots, Q'_{tnl}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0}(nc \times nc) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{MM}_{cev} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \text{diag}(\mathbf{P}'_{s1}, \dots, \mathbf{P}'_{snl}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \text{diag}(\mathbf{Q}'_{s1}, \dots, \mathbf{Q}'_{snl}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{cev} \mathbf{T}_{cev}^{-1} (nc \times nl) & \mathbf{0}(nc \times nc) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{cev} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{cev} \mathbf{T}_{cev}^{-1} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}(nl \times nl) & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}(nl \times nl) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \text{diag}(\frac{1}{T_1}, \dots, \frac{1}{T_{nc}}) \end{bmatrix}$$

Finalmente, resolviendo la ecuación (3.24) para $\dot{\Delta \mathbf{x}}$ se obtiene el modelo de estado

$$\begin{aligned} \dot{\Delta \mathbf{x}} &= \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \\ \Delta \mathbf{y} &= \mathbf{C} \Delta \mathbf{x} \end{aligned} \quad (3.25)$$

en donde

$$\mathbf{A} = (\mathbf{J}_{cev} - \mathbf{N}\mathbf{N}_{cev})^{-1} (\mathbf{D}\mathbf{T}_{cev})^{-1} (\mathbf{M}\mathbf{M}_{cev} - \mathbf{H} \mathbf{J}_{cev}) \quad (3.26)$$

y

$$\mathbf{B} = (\mathbf{J}_{cev} - \mathbf{N}\mathbf{N}_{cev})^{-1} (\mathbf{D}\mathbf{T}_{cev})^{-1} \mathbf{B}_{cev} \quad (3.27)$$

El modelo propuesto presenta las siguientes características

- La estabilidad ante disturbios pequeños está caracterizada por $N=2nl+nc$ modos de interés; los modos $nl+1, \dots, 2nl$ corresponden a los modos de estabilidad de voltaje utilizados en este trabajo. Debido a la asimetría de la matriz de estado, los modos serán reales y complejos conjugados.
- En analogía con el análisis de estabilidad angular, las entradas del eigenvector derecho correspondientes a las magnitudes de voltajes indican los nodos con mayor participación en cada modo en estudio; al agrupar estos nodos se obtienen las áreas críticas de voltaje.
- La estabilidad del sistema está determinada por el efecto combinado de las matrices $(\mathbf{J}_{cev} - \mathbf{N}_{cev})$ y $(\mathbf{M}_{cev} - \mathbf{J}_{cev})$. Nótese, en este caso, que la representación de dispositivos de control aumenta el grado de asimetría de la matriz de estado.

3.3.5 Determinación de áreas críticas de voltaje e identificación de elementos de control dominantes

Considérese que el comportamiento dinámico del sistema se expresa mediante el modelo lineal

$$\begin{aligned}\dot{\Delta \mathbf{x}} &= \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \\ \Delta \mathbf{y} &= \mathbf{C} \Delta \mathbf{x}\end{aligned}$$

donde:

$$\begin{aligned}\mathbf{x} &= [\theta_{d^1}, \dots, \theta_{d^{nd}}, V_{d^1}, \dots, V_{d^{nd}}, \beta_1, \dots, \beta_{nc}]^T \\ \mathbf{u} &= [V_{ref^1}, \dots, V_{ref^{nc}}]^T \\ \mathbf{y} &= [V_{d^1}, \dots, V_{d^{nd}}]^T\end{aligned}$$

En el modelo adoptado, la influencia de un dispositivo de control en un modo de interés, se determina mediante el estudio de los residuos de la función de transferencia:

$$\mathbf{F}(s) = \frac{\Delta \mathbf{y}}{\Delta \mathbf{u}} = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i}$$

donde R_i es la matriz de residuos residuo de la función de transferencia $\mathbf{F}(s)$ asociado con el i -ésimo valor propio de \mathbf{A} .

Para propósitos de análisis el residuo se expresa como:

$$R_i = \mathbf{b}_i \cdot \mathbf{c}_i$$

donde

$\mathbf{b}_i = \xi_i^t \cdot \mathbf{b}$ es el índice de controlabilidad

$\mathbf{c}_i = \mathbf{C} \cdot \eta_i$ es el índice de observabilidad

ξ_i y η_i son los eigenvectores izquierdo y derecho, respectivamente de la matriz \mathbf{A} asociados al modo λ_i . Detalles sobre esta formulación pueden encontrarse en [4].

Nótese que en el análisis de estabilidad de voltaje, la función de transferencia de interés está dada por la relación entre los voltajes terminales de los nodos de carga y el voltaje de referencia de los dispositivos de control:

$$F(s) = \frac{\Delta V_d(s)}{\Delta V_{refc}(s)}$$

El procedimiento es general y puede extenderse al estudio de redes con dispositivos múltiples de control.

Conceptualmente, el procedimiento básico adoptado para determinar la influencia de dispositivos de control en el fenómeno de estabilidad de voltaje comprende los siguientes pasos:

- Para cada modo crítico, se determina su controlabilidad y observabilidad: el coeficiente de observabilidad proporciona una medida preliminar de las áreas (nodos) del sistema más vulnerables a la inestabilidad; el coeficiente de controlabilidad permite identificar la capacidad de un dispositivo existente de control para mejorar el margen de estabilidad del modo de estudio.
- Los nodos con mayor magnitud de residuo indican los dispositivos de control con mayor influencia en cada modo.
- Los elementos de la matriz de residuos fuera de la diagonal principal indican dispositivos de control que pueden interactuar de manera positiva o negativa en el modo correspondiente.

3.4 MODELO DE ESTADO BASADO EN EL CONCEPTO DE POTENCIA DE RECUPERACIÓN

Una alternativa de interés al estudio de estabilidad de voltaje se obtiene al representar a las potencias de recuperación de la carga como variables de estado. Sea

$$\mathbf{x} = \left[\Delta P_{r,1} \quad \dots \quad \Delta P_{r,nl} \quad \Delta Q_{r,1} \quad \dots \quad \Delta Q_{r,nl} \right]^T$$

el nuevo vector de estado del sistema. Este modelo conduce a un conjunto de ecuaciones diferenciales y algebraicas como se explica a continuación.

3.4.1 Interfaz entre las ecuaciones de la carga y la red de transmisión

Si se asume que la demanda en cada nodo de carga en el sistema está definida por las ecuaciones (3.3) y (3.4), se obtiene la expresión algebraica

$$\Delta \mathbf{S}_d = \mathbf{C}_r \Delta \mathbf{x} + \mathbf{N} \mathbf{N} \Delta \mathbf{U} \quad (3.28)$$

en donde $\mathbf{C}_r = \mathbf{I}(2nl \times 2nl)$. Igualando las expresiones (3.28) y (3.10), y simplificando se obtiene

$$\mathbf{C}_r \Delta \mathbf{x} + \mathbf{N} \mathbf{N} \Delta \mathbf{U} = \mathbf{J} \Delta \mathbf{U} \quad (3.29)$$

de donde

$$\mathbf{C}_r \Delta \mathbf{x} + (\mathbf{NN} - \mathbf{J})\Delta \mathbf{U} = \mathbf{0} \quad (3.30)$$

La ecuación (3.30) se utiliza, en esta formulación, para acoplar el modelo dinámico de la carga con la representación algebraica de la red.

3.4.2 Modelo parcial de estado

El modelo parcial de estado basado en la definición de potencias de recuperación se obtiene de las ecuaciones (3.1) y (3.2) como

$$\mathbf{DT} \dot{\Delta \mathbf{x}} = \mathbf{MM} \Delta \mathbf{U} - \Delta \mathbf{S}_d \quad (3.31)$$

Substituyendo la expresión algebraica para $\Delta \mathbf{S}_d$ de (3.28) en (3.31) se obtiene

$$\dot{\Delta \mathbf{x}} = -\mathbf{DT}^{-1} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{DT}^{-1}(\mathbf{MM} - \mathbf{NN})\Delta \mathbf{U} = \mathbf{A}_p \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}_p \Delta \mathbf{U} \quad (3.32)$$

donde

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_p &= -\mathbf{DT}^{-1} \\ \mathbf{B}_p &= \mathbf{DT}^{-1}(\mathbf{MM} - \mathbf{NN}) \end{aligned}$$

Por último, substituyendo (3.30) en (3.32) y resolviendo para el vector de estados, se tiene que

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} \quad (3.33)$$

donde

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_p - \mathbf{B}_p (\mathbf{NN} - \mathbf{J})^{-1}$$

3.4.3 Formulaciones alternas para el estudio de redes de gran dimensión

La formulación anterior es impráctica para el estudio de redes de gran dimensión debido a la naturaleza densa de la matriz de estado. Una desventaja adicional de este enfoque es la imposibilidad de analizar de manera directa el fenómeno de estabilidad de voltaje. A continuación se propone un modelo pseudo-dinámico del sistema derivado de las ecuaciones individuales del modelo dinámico de la carga y la representación estática de la red.

En analogía con el estudio de modos electromecánicos en sistemas de potencia, considérese ahora que la ecuación de estado (3.32) y la interfaz carga-red, ecuación (3.30), se expresan en la forma mixta:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_p & \mathbf{B}_p \\ \mathbf{C}_r & (\mathbf{NN} - \mathbf{J}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{U} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{V}_{ref} \quad (3.34)$$

y

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_x^T & \mathbf{C}_u^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{U} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

El procedimiento propuesto de análisis comprende los siguientes pasos:

- Se obtiene la matriz aumentada de estado en (3.34).
- Se calculan los modos del sistema para esta matriz. Los vectores derechos correspondientes a la matriz aumentada para un modo de interés λ_i , se calculan de acuerdo a las relaciones modificadas

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_p & \mathbf{B}_p \\ \mathbf{C}_r & (\mathbf{NN} - \mathbf{J}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W}_i \\ \mathbf{W}_{v,i} \end{bmatrix} = \lambda_i \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W}_i \\ \mathbf{W}_{v,i} \end{bmatrix}$$

Para el vector izquierdo se obtienen relaciones similares.

Es importante destacar que en esta formulación las submatrices \mathbf{A}_p , \mathbf{B}_p , \mathbf{C}_r y $(\mathbf{NN} - \mathbf{J})$ son matrices extremadamente dispersas; este enfoque permite el análisis eficiente de redes de gran dimensión. Obsérvese además, que la matriz \mathbf{B} aparece debido a la representación de elementos de control en el sistema.

3.4.3.1 Inclusión de dispositivos de control

La inclusión de dispositivos de control en este modelo se realiza de manera similar a lo descrito en la sección 3.3.3.1, por lo cual se omite su descripción.

3.5 ALGORITMO COMPUTACIONAL PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE

En esta sección se describen brevemente los algoritmos computacionales para el estudio de la estabilidad de voltaje desarrollados en el transcurso de este trabajo. Se asume que el sistema se representa mediante los modelos de estado en las ecuaciones (3.20) o (3.30).

La Figura 3.6 ilustra gráficamente la estructura del algoritmo computacional. A continuación, se describen las principales etapas que componen a este algoritmo.

3.5.1 Determinación del punto de equilibrio en estado estable

En el algoritmo propuesto, la condición de operación del sistema en el punto de equilibrio se obtiene de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Para cada condición de operación de interés, se obtiene una solución factible mediante un estudio convencional de flujos de potencia; la carga se representa con una característica de potencia constante y se consideran los límites de operación en generadores y dispositivos de control en la red de transmisión. Para esta solución, se determinan las submatrices de la matriz Jacobiana asociadas a los nodos de carga.
- Se obtienen las submatrices de estado **A**, **B** y **C** para el análisis de interés y se obtiene la descomposición espectral del sistema.
- Se seleccionan los modos de interés asociados al fenómeno de estabilidad de voltaje; en el modelo propuesto, estos modos exhiben una bifurcación en la vecindad del punto de colapso de voltaje caracterizada por un aumento en la magnitud del valor propio. Para cada modo de interés, se determinan las áreas del sistema más susceptibles a experimentar la inestabilidad, siguiendo el procedimiento establecido en la sección 3.3.5.
- Se evalúa la efectividad de elementos de control para mejorar el margen de estabilidad del sistema y se analiza el potencial de interacción, mediante el análisis de la matriz de residuos asociada a los elementos de control.

El proceso se repite de manera iterativa hasta que se determine la condición de bifurcación del sistema o no se logre obtener una solución factible al problema de flujos de potencia. Los dos criterios utilizados para determinar la condición de bifurcación incluyen:

- La determinación del cambio de signo en el valor propio asociado al modo crítico de voltaje; en la práctica esto no es posible debido a la presencia de bifurcación en el comportamiento del modo de voltaje
- La evaluación numérica del determinante de las matrices $(\mathbf{J}-\mathbf{NN})$ y $(\mathbf{MM}-\mathbf{J})$ o, equivalentemente, el valor singular asociado a estas submatrices.

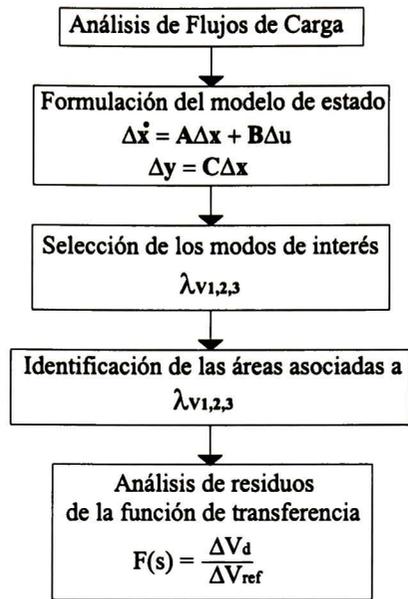


Figura 3.6.- Algoritmo computacional para el análisis de estabilidad de voltaje

En este capítulo se ha desarrollado un modelo dinámico de pequeña señal, el cual permite la adecuada representación de los elementos con la mayor influencia en el fenómeno de inestabilidad de voltaje. Por otra parte se ha demostrado como el límite de estabilidad esta asociado a una bifurcación tipo silla o singular inducida. En el capítulo 4 se muestra la aplicación de la metodología desarrollada en este trabajo a un sistema con características reales.

CAPÍTULO 4

APLICACIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo, se aborda la aplicación práctica de la metodología desarrollada para el análisis de estabilidad de voltaje en un sistema de prueba derivado de una red real. El objetivo fundamental de este análisis es la validación de las herramientas analíticas desarrolladas, así como la evaluación de los distintos factores que influyen en el fenómeno de estabilidad de voltaje.

El estudio se centra en el análisis y control de tres modos críticos de voltaje asociados al comportamiento del sistema en zonas que exhiben problemas severos de control de voltaje. Los resultados obtenidos se comparan con otras técnicas de análisis y, más concretamente, con la técnica de análisis modal de la matriz Jacobiana de flujos de carga y el estudio de curvas Q-V obtenidas para nodos importantes del sistema. Por último, se hace un análisis de la influencia del control de voltaje mediante dispositivos FACTS en el problema de estabilidad de voltaje y se proponen alternativas de control para mejorar los márgenes existentes de estabilidad.

El capítulo está organizado de la siguiente manera. En la sección 4.2 se describen las características del sistema de estudio, así como las consideraciones de modelado adoptadas en los estudios presentados. En la sección 4.3, se analizan las características de estabilidad de voltaje del sistema en el contexto del análisis modal de las ecuaciones de flujos de potencia. En la sección 4.4, se aborda la aplicación del método de análisis propuesto, al estudio de estabilidad de voltaje en el sistema de estudio. Se establecen comparaciones con el método de análisis estático y se discute la aplicación de estrategias de control basadas en la aplicación de CEV y STATCOM, para mejorar la estabilidad de voltaje bajo condiciones de carga considerable en el sistema.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EN ESTUDIO

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama unifilar de la red eléctrica en estudio. El sistema representa un equivalente hipotético del sistema de transmisión de 115, 230 kV del Sistema Peninsular Mexicano (SPM) constituido por 96 nodos, 18 generadores, 12 bancos de compensación fija en paralelo y 3 compensadores estáticos de VAR. El caso base de operación, así como las condiciones de modelado, son esencialmente las descritas en la referencia [29], modificadas para agregar la operación de CEV en distintos nodos del sistema y las características dinámicas de la carga.

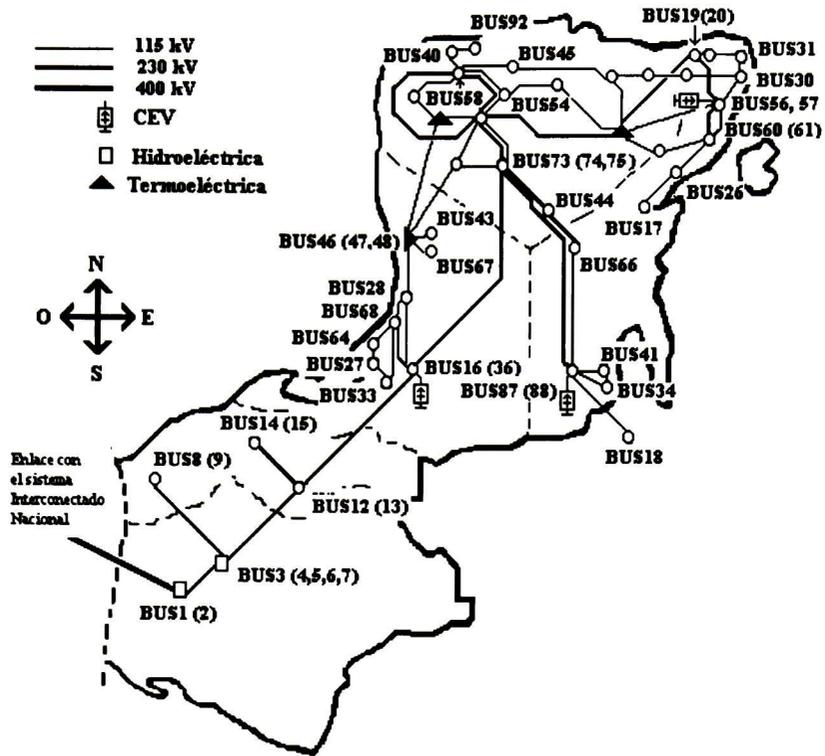


Figura 4.1. - Diagrama geográfico del sistema en estudio mostrando la ubicación de los elementos principales de generación, transmisión y compensación existentes

En la Figura 4.2 se muestra la distribución de demanda aparente del sistema; cabe destacar que para la condición inicial de operación, la demanda total del sistema es de 1235 MW y 303 MVar. Adicionalmente, en la Figura 4.3 se muestra el perfil de voltaje del sistema correspondiente a la condición base de operación.

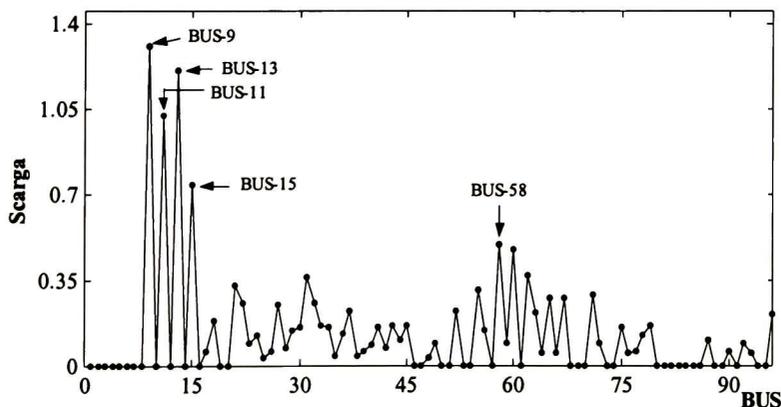


Figura 4.2.- Distribución de potencia aparente demandada en el sistema en estudio

Es importante señalar en este análisis que la mayor concentración de carga se presenta en la zona de Tabasco (nodos 9,11,13 y 15) en la interconexión del SPM con el sistema interconectado Mexicano y en las zonas metropolitanas de Mérida (BUS-58) y Cancún (BUS-60). El sistema exhibe una zona con niveles de tensión extremadamente bajos definida por los nodos 18, 34, 41 y 88.

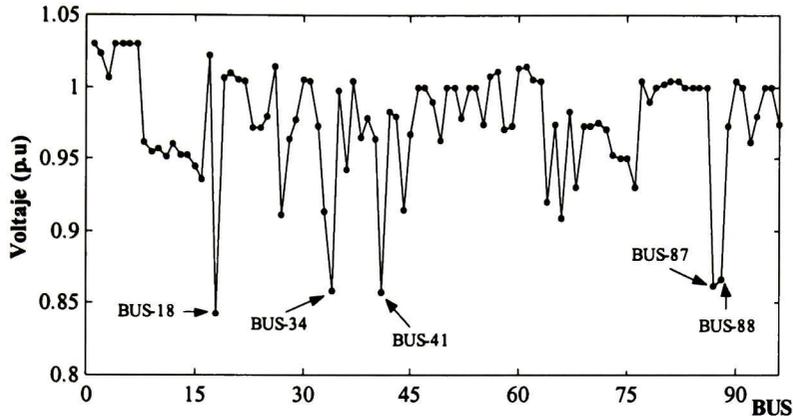


Figura 4.3.- Gráfico del perfil de voltaje del SPM correspondiente al caso base de operación

4.3 ANÁLISIS MODAL DE LAS ECUACIONES DE FLUJOS DE POTENCIA

El análisis modal de las ecuaciones de flujos de potencia se utilizó, en este trabajo, como herramienta de comparación con las técnicas de análisis propuestas. Para una descripción más completa del método utilizando así como las consideraciones de modelado adoptadas puede consultarse la referencia [30].

El modelo estático del SPM contiene 78 modos asociados al fenómeno de estabilidad de voltaje. Los estudios que se presentan a continuación se centran en el análisis de los tres modos con menor margen de estabilidad. En estos estudios, la matriz Jacobiana de flujos de potencia se determinó utilizando la herramienta propuesta en [28].

El procedimiento adoptado de análisis comprende dos etapas principales:

- El comportamiento del sistema se expresó mediante el modelo reducido del sistema de potencia

$$\Delta V = \left[\mathbf{J}_{QV} - \mathbf{J}_{Q\theta} \mathbf{J}_{P\theta}^{-1} \mathbf{J}_{PV} \right]^{-1} \Delta Q = \mathbf{J}_R \Delta Q = \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{P}_i}{\lambda_i} \Delta Q$$

en donde \mathbf{J}_R es la matriz Jacobiana reducida del sistema y los coeficientes λ_i ($i=1,\dots,n$) son los valores propios de la matriz \mathbf{A} ; la matriz \mathbf{P}_i se define como la matriz de factores de participación (FP) asociada al i -ésimo modo. En este contexto, el sistema es estable en el sentido de voltaje si todos los valores propios de la matriz Jacobiana reducida son positivos.

- La carga del sistema se aumentó de manera gradual, con incrementos constantes hasta alcanzar la última condición de flujos de potencia para la cual fue posible obtener una solución. Para esta condición de operación se calcularon los modos críticos de voltaje, las áreas susceptibles a exhibir inestabilidad así como los elementos con una mayor participación en los modos de interés.

Los casos de estudio seleccionados para el análisis modal incluyen: a) Un caso base de operación, el cual representa la operación del sistema para la condición de demanda máxima sin considerar la operación de CEV, y b) La operación del sistema en la condición de máxima cargabilidad, considerando distintas alternativas de control.

4.3.1 Análisis del caso base de operación

En la Tabla 4.1 se muestran los tres modos de voltaje con menor magnitud obtenidos para la condición base de operación. Además, se incluyen los cinco nodos del sistema con mayor factor de participación en cada uno de los modos críticos. Nótese que el sistema es estable y que el factor de participación (FP_{ki}) describe la contribución del i -ésimo valor propio a la sensibilidad V-Q en el bus k ; un valor grande del FP indica una contribución importante del modo en esta sensibilidad.

Es importante notar, además, en esta información que el modo 3 exhibe una parte imaginaria indicando la asimetría de la matriz Jacobiana. Las áreas geográficas asociadas a estos modos se pueden ver en la Figura 4.4.

Tabla 4.1
Factores de participación asociados a los modos críticos de voltaje

$\lambda_{v1} = 0.2190$		$\lambda_{v2} = 0.4586$		$\lambda_{v3} = 0.67 \pm j0.011$	
BUS	F.P*	BUS	F.P*	BUS	F.P*
18	0.1183	17	0.0611	27	0.1395
34	0.1086	26	0.0542	33	0.1392
41	0.1082	31	0.0504	64	0.1137
87	0.1032	60	0.0500	68	0.0836
88	0.0912	62	0.0499	28	0.0154

F.P- Factor de participación

Para el modo crítico λ_{v1} , el análisis de factores de participación identifica a la zona con menores niveles de tensión en el sistema como la zona más vulnerable a la inestabilidad. Esta zona describe un nodo principal (BUS 88) y tres nodos conectados de manera radial a él (nodos 18,34 y 41); el análisis de factores de participación en la Tabla 4.1, por otro lado, muestra una contribución similar de varios nodos indicando varias alternativas posibles de control de voltaje para controlar este modo.

En contraste, el modo 2 describe dos zonas geográficas adyacentes, separadas por un nodo conectado directamente a un generador. Los nodos ubicados en el extremo de la primera zona (nodos 17 y 26) muestran la mayor participación. Por último, el análisis del modo 3 identifica a una red de subestaciones formando un anillo (nodos 27,33,64). Este modo es de naturaleza localizada, exhibiendo la participación dominante de dos nodos principales.

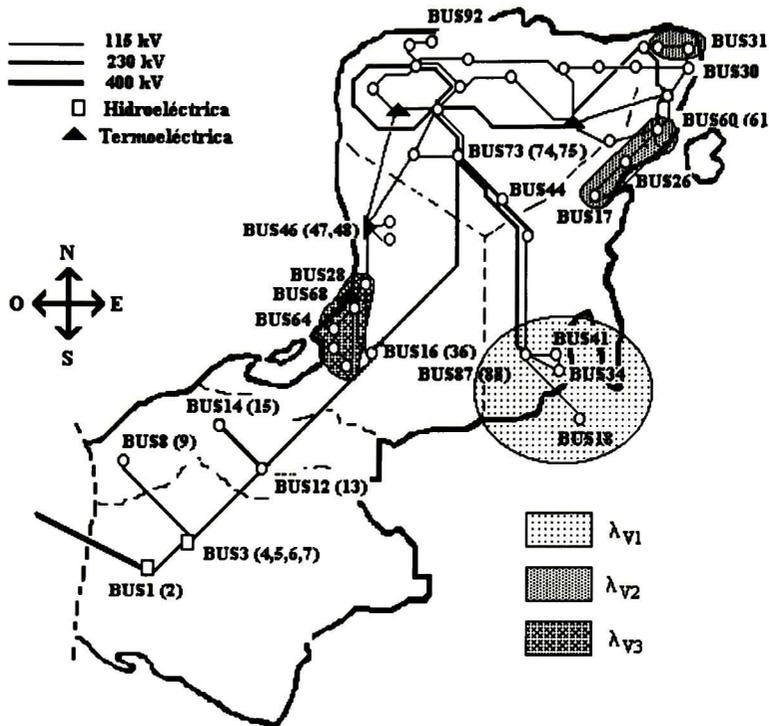


Figura 4.4. - Ubicación geográfica de las áreas críticas de voltaje correspondientes al caso base de operación. No se consideran dispositivos de control de voltaje.

Por otra parte, el análisis de la sensibilidad de los modos críticos con respecto a la reactancia serie de las líneas de transmisión en la Tabla 4.2 muestra, en general, que los enlaces de transmisión con mayor participación en estos modos se encuentran dentro de la zona crítica determinada por el análisis de factores de participación. Así, por ejemplo, para el modo 1, el análisis identifica a la línea de transmisión con mayor longitud en la zona crítica (enlace entre los nodos 18 y 87) como el enlace más débil.

Tabla 4.2
Sensitividad de los modos críticos con respecto
a la reactancia serie de las líneas de transmisión

$\lambda_{v1} = 0.2190$		$\lambda_{v2} = 0.4586$		$\lambda_{v3} = 0.67 \pm 0.0111$	
Enlace	$\frac{\partial \lambda}{\partial x_{línea}}$	Enlace	$\frac{\partial \lambda}{\partial x_{línea}}$	Enlace	$\frac{\partial \lambda}{\partial x_{línea}}$
18-87	0.4868	17-26	0.2358	27-33	2.7120
34-41	0.4766	26-60	0.2121	27-64	2.5050
34-87	0.4630	31-62	0.2017	33-68	2.3117
41-87	0.4618	30-31	0.2013	64-68	2.0710
88-87	0.4155	21-62	0.1993	28-68	1.5557

4.3.2 Determinación de la condición de máxima cargabilidad

La condición de máxima cargabilidad se determinó siguiendo el procedimiento descrito en la referencia [30]. En la Figura 4.5 se muestra el comportamiento de los modos de interés ante incrementos en la demanda. Se incluye, asimismo, una descripción gráfica de los generadores que alcanzan sus límites de operación. Es importante destacar en esta Figura que la condición de máxima cargabilidad se obtiene para un incremento de demanda del 1.63 % respecto a la condición base de operación; en ésta condición solo 11 generadores del sistema mantienen reservas de potencia reactiva.

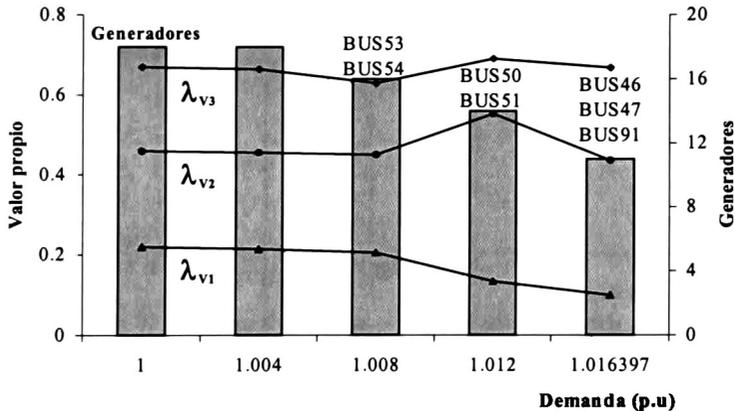


Figura 4.5.- Comportamiento de los modos críticos de voltaje en función del nivel de carga del sistema y los generadores que alcanzan sus límites de operación

Como se observa, el modo crítico tiende a cero conforme se incrementa la demanda del sistema, indicando que la matriz Jacobiana tiende a ser singular. Una característica interesante observada es que en ciertos niveles de demanda los valores propios presentan cambios bruscos de pendiente, y específicamente, cuando la demanda es 1.008 y 1.012 p.u. Este comportamiento se asocia al redimensionamiento de la matriz Jacobiana al cambiar el modelo de un nodo de tipo PV a tipo PQ.

Para facilitar el análisis de los resultados, en las figuras 4.6 y 4.7 se presentan los perfiles de voltaje y las curvas V-Q para los nodos críticos, correspondientes a la condición de máxima cargabilidad.

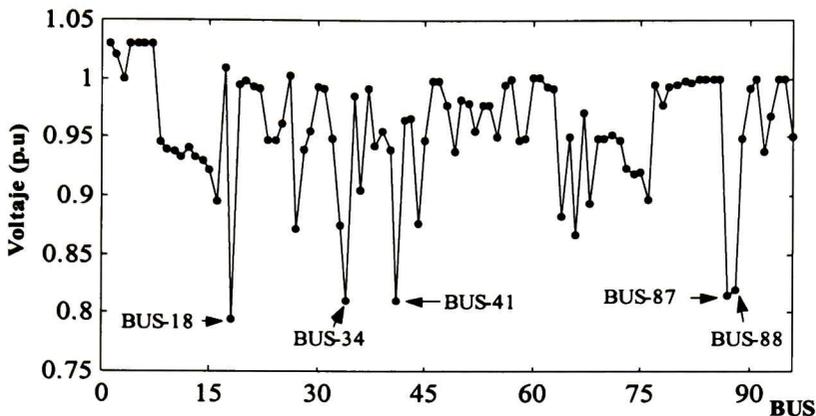


Figura 4.6.- Perfil de voltajes en la condición de máxima cargabilidad

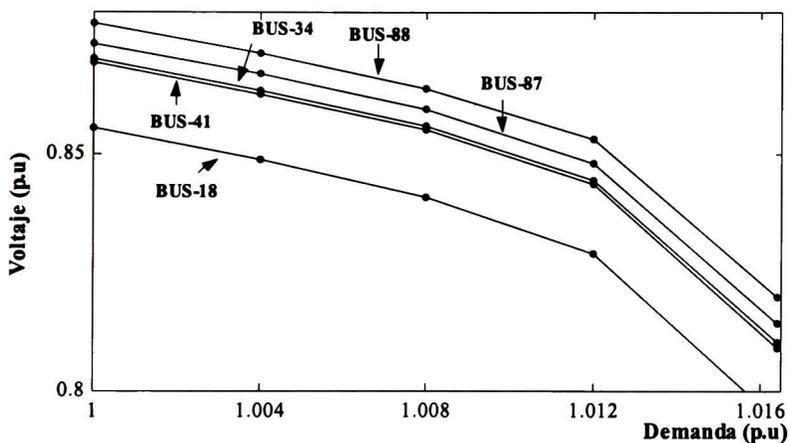


Figura 4.7.- Curva demanda – voltaje para el nodo BUS-18

En la Tabla 4.3 se pueden ver los modos críticos de voltaje, así como los nodos con mayor participación en cada uno de ellos. Las zonas geográficas definidas por estos nodos se muestran en la Figura 4.8. El análisis muestra que el aumento en la cargabilidad del sistema concentra la zona crítica del sistema a la zona definida por el modo 1; los nodos más vulnerables del sistema están definidos por los nodos BUS-18 y BUS-34.

Tabla 4.3
Factores de participación nodal para la condición de máxima cargabilidad

$\lambda_{v1} = 0.0998$		$\lambda_{v2} = 0.4358 \pm 0.0173 i$		$\lambda_{v3} = 0.6671 \pm j0.01 i$	
BUS	F.P	BUS	F.P	BUS	F.P
18	0.0703	18	0.0548	27	0.0498
34	0.0657	34	0.0467	33	0.0496
41	0.0656	41	0.0463	64	0.0391
87	0.0632	27	0.0434	68	0.0270
88	0.0576	33	0.0433	54	0.0117

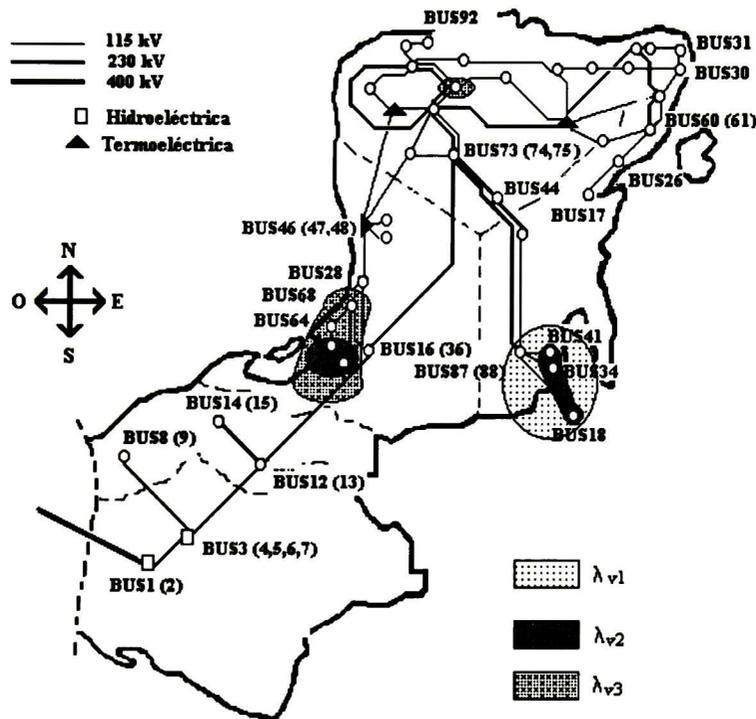


Figura 4.8.- Ubicación geográfica de las áreas críticas de voltaje para la condición de máxima cargabilidad

4.3.3 Efecto de control de voltaje en el margen de estabilidad de estado estable

En esta sección se investiga la capacidad de los CEV existentes en los nodos 16,87 y 56 para mejorar los márgenes de estabilidad. La Figura 4.9 muestra el perfil de voltaje del sistema considerando la instalación de CEV en los nodos de interés. Como se observa, la utilización de tres CEV permite obtener un mejor perfil de voltajes en el sistema. El análisis de las curvas demanda-voltaje para los nodos críticos en la Figura 4.10, por otro lado, permite confirmar que el control de voltaje aumenta en forma importante la cargabilidad del sistema.

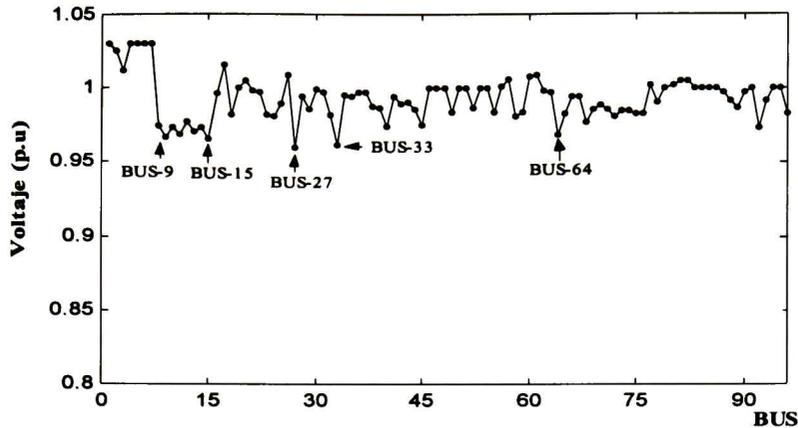


Figura 4.9.- Perfil de voltajes considerando CEV

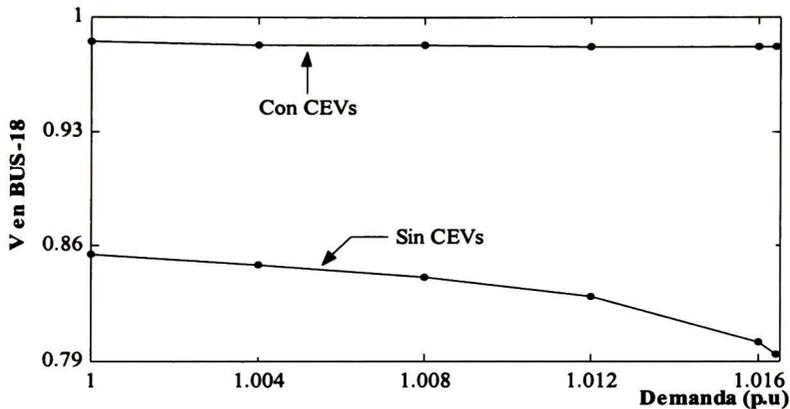


Figura 4.10.- Curvas voltaje – demanda en nodos críticos ilustrando el efecto de la aplicación de control de voltaje

Con objeto de verificar el aumento logrado en los márgenes de estabilidad de los modos críticos, se calcularon los valores propios para la última condición factible de flujos de potencia. En la Tabla 4.4. se resumen los valores propios obtenidos, indicándose el aumento en el margen de estabilidad obtenido respecto al caso base sin control.

Cabe destacar que la aplicación de los CEV permite un aumento en este margen de estabilidad del modo crítico de alrededor del 7.6%. El análisis de las nuevas zonas geográficas con mayor participación en los modos de interés en la Figura 4.11 permite, por otro lado, establecer que:

- La ubicación de los tres CEV permite inhibir el riesgo de inestabilidad en la zona crítica definida originalmente por los nodos 18,34 y 41
- El análisis modal para esta condición de operación identifica a la zona original correspondiente al modo 3. El análisis sugiere que la aplicación de un CEV en el BUS-16 no permite mejorar los márgenes de estabilidad de la tercera zona crítica

correspondiente al caso base de operación. Una alternativa de interés es reubicar este CEV al nodo con mayor factor de participación en este modo (BUS-33)

Estos aspectos se discuten en mayor detalle en los siguientes apartados.

Tabla 4.4
Modos críticos de voltaje en la condición de máxima cargabilidad

Condición de operación	λ_{v1}	λ_{v2}	λ_{v3}	Margen de estabilidad (%)
Condición de máxima cargabilidad sin CEV	0.099	$0.43 \pm 0.017 i$	$0.66 \pm 0.12 i$	1.63
Condición de máxima cargabilidad con CEV	$0.745 \pm 0.089 i$	1.442	2.418	7.62

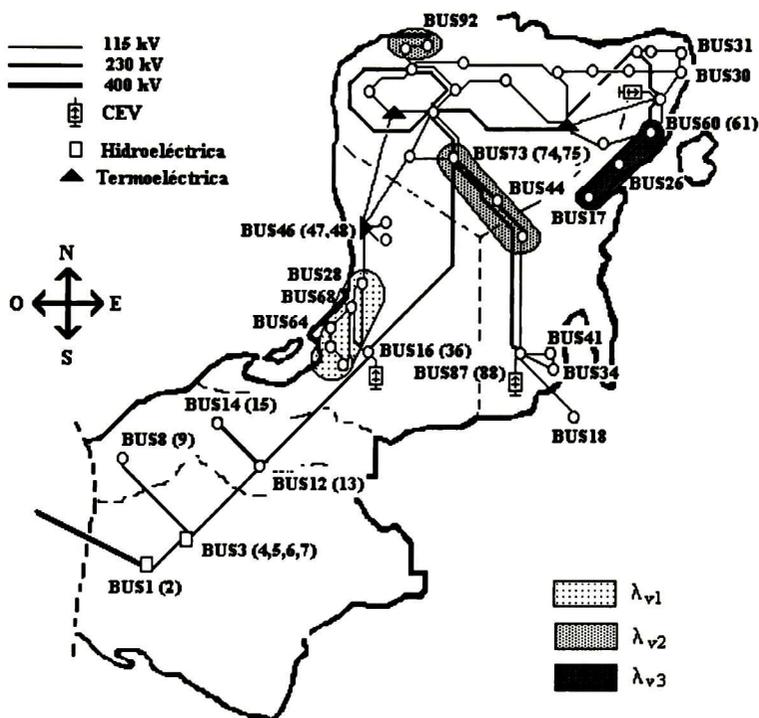


Figura 4.11.- Ubicación de áreas críticas de voltaje considerando la aplicación de 3 CEV

4.4 ANÁLISIS DINÁMICO

En esta sección se investiga la aplicación del modelo dinámico desarrollado al estudio de la estabilidad de voltaje. Para permitir una mejor evaluación de los resultados obtenidos, se asumen las mismas condiciones de operación adoptadas para el análisis estático, modificadas para incluir las características dinámicas de la carga.

El modelo lineal de estado correspondiente al caso base de operación en los estudios presentados es de 156 variables de estado; de éstas, 78 modos se asocian al problema de estabilidad de voltaje. Los estudios presentados en los siguientes apartados se centran en el análisis de los tres modos más susceptibles a exhibir problemas de inestabilidad.

4.4.1 Efecto de las características de la carga en el estudio de estabilidad de voltaje

Los casos de interés considerados en los estudios presentados en las siguientes secciones se resumen en la Tabla 4.5 y corresponden a la representación de la carga mediante parámetros reportados en la literatura [20]. El comportamiento de la carga asociado a estos casos se muestra gráficamente en la Figura 4.12.

Tabla 4.5
Características de la carga consideradas en el estudio

Descripción del caso	α_s	α_t	β_s	β_t	T_p	T_q
Caso 1	0.310	1.85	3.53	4.18	163.4	131.7
Caso 2	0.570	1.64	3.94	4.80	164.8	167.8
Caso 3	0.0	1.85	0.0	4.18	163.4	131.7
Caso 4	0.310	1.85	3.53	4.18	83	3.4

Los valores propios para la condición de operación correspondiente al caso base se pueden ver en la Tabla 4.6. Es importante destacar que el análisis dinámico sintetiza tres modos reales, indicando un comportamiento estable de naturaleza monotónica.

A continuación, se discute, el comportamiento del sistema para los varios casos de operación considerados.

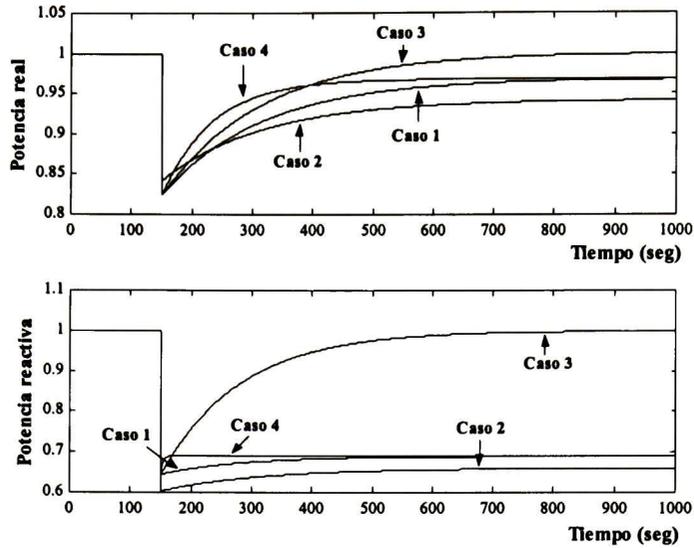


Figura 4.12.- Respuesta de la carga ante un escalón de voltaje considerando los parámetros de la Tabla 5.8

En las tablas 4.6 y 4.7 se muestran los valores propios del sistema correspondientes a los caso 1 y 2 de operación. El análisis de factores de participación revela que el modelo dinámico permite identificar las mismas áreas críticas que el análisis estático (refiérase a la Tabla 4.1); el estudio de los factores de participación, sin embargo, identifica un orden distinto de importancia en estos buses.

Para el modo 2, por otra parte, los métodos estático y dinámico conducen a una identificación jerárquica distinta de los nodos críticos: es importante destacar, sin embargo, que los nodos determinados mediante ambas técnicas se encuentran dentro de la misma área geográfica.

Tabla 4.6
Factores de participación en el punto de operación base correspondientes al caso 1

$\lambda_{v1} = -0.0655$		$\lambda_{v2} = -0.012$		$\lambda_{v3} = -0.0088$	
BUS	F.P	BUS	F.P	BUS	F.P
18	0.338	60	0.211	27	0.737
87	0.264	62	0.170	33	0.492
41	0.228	31	0.153	64	0.133
34	0.216	21	0.141	68	0.112
88	0.063	56	0.120	36	0.077

Tabla 4.7
Factores de participación nodal para el punto de operación base, caso 2

$\lambda_{v1} = -0.2136$		$\lambda_{v2} = -0.0107$		$\lambda_{v3} = -0.0077$	
BUS	F.P	BUS	F.P	BUS	F.P
18	0.294	60	0.146	27	0.482
34	0.208	31	0.125	33	0.318
41	0.205	62	0.125	64	0.067
87	0.113	21	0.108	15	0.012
44	0.032	22	0.084	13	0.011

El análisis de los otros casos, muestra que en general, el modelo de la carga cambia el orden de los nodos dominantes en cada modo, aunque describen la misma área y se omite la presentación de resultados.

4.4.2 Margen de estabilidad bajo condiciones de estrés

El análisis de la influencia de la carga para los modos de interés se analizó finalmente para la condición de máxima cargabilidad del sistema. Siguiendo la aproximación propuesta en el capítulo 3, el límite de estabilidad en el sistema se determinó de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Las cargas activa y reactiva del sistema se incrementaron en pasos constantes hasta la última solución para la que se obtuvo convergencia en el problema de flujos de potencia ó hasta que algún λ_v presente parte real positiva.
- Para cada condición de operación, el comportamiento dinámico del sistema se obtiene del análisis de valores propios de la matriz de estado de lazo abierto.

$$A = (J - NN)^{-1} (DT)^{-1} (MM - J)$$

En la Figura 4.13 se muestra de manera gráfica el comportamiento del modo crítico de voltaje para las cuatro alternativas de modelado de carga consideradas. Es interesante notar que el análisis dinámico muestra que el límite de estabilidad se obtiene para un incremento en la demanda de 0.1658% para el caso 2 y de 0.6992% para los casos 1,3,4. En contraste, el límite de estabilidad obtenido mediante el análisis estático en la sección 4.3.2 fue de 1.63%.

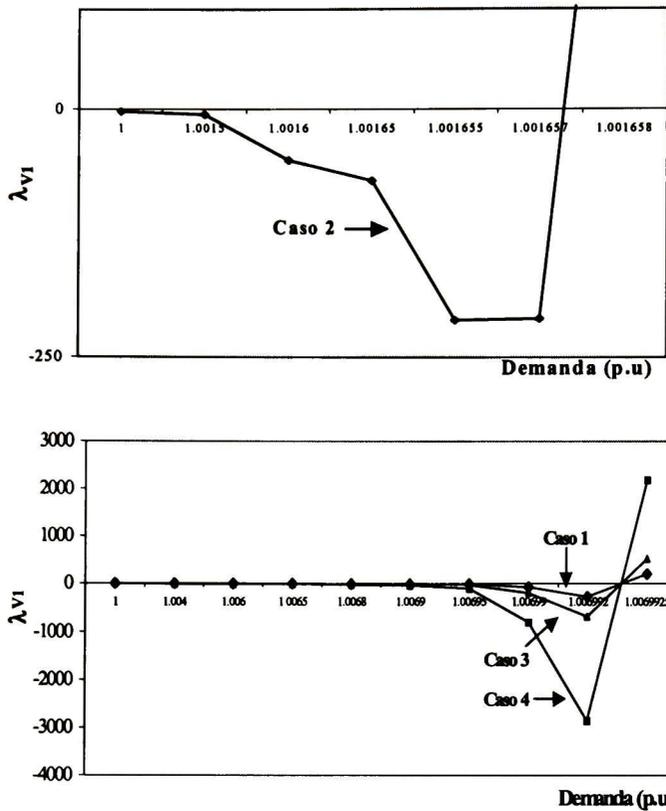


Figura 4.13.- Comportamiento del modo crítico de voltaje para los casos de operación considerados

La comparación entre los resultados obtenidos para los distintos modelos de carga permite comprobar que:

- Las características transitorias de la carga modifican en forma perceptible los márgenes de estabilidad del sistema. En general, se observa que, cuando la carga presenta una mayor variación transitoria (aumento en β_t) se reduce el margen de estabilidad [18]. El mismo análisis muestra que el modelo dinámico presenta menores márgenes de estabilidad que el modelo estático.
- Las características de comportamiento de estado estable y los tiempos de recuperación de la carga no tienen un efecto en la estabilidad de voltaje. Esto puede verificarse al comparar los casos 1,3 y 4.
- El análisis dinámico de los valores propios muestra un cambio brusco de pendiente para la condición de máxima cargabilidad. La condición de bifurcación está determinada por un valor grande del valor propio de voltaje. En general, la magnitud del modo aumenta y, en el punto de bifurcación, cambia de signo. Este análisis sugiere, asimismo, la necesidad de una herramienta de estudios de flujos de potencia

en estado estable con la capacidad de determinar de manera precisa el punto de máxima cargabilidad.

Con objeto de clarificar la causa de la singularidad en la matriz de estado, en la Figura 4.14 se muestra el comportamiento de las submatrices de la representación de estado. Se puede observar que el determinante $\det(\mathbf{J} - \mathbf{N}\mathbf{N}) = 0$ en la condición de inestabilidad, en este punto $\lambda_{v1} \rightarrow -\infty$. Asimismo, la determinación del punto de inestabilidad requiere de la solución de estudios sucesivos de flujos de potencia con incrementos de carga infinitesimales como se muestra en la Figura 4.14.

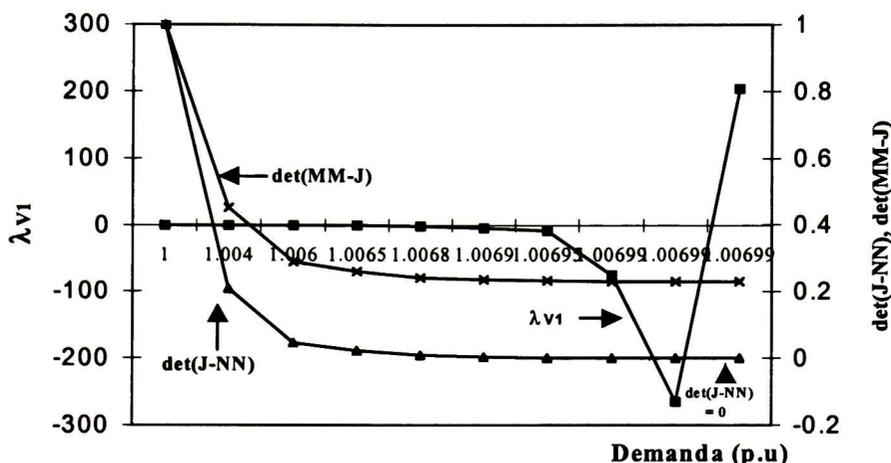


Figura 4.14 Comportamiento del determinante de las submatrices de estado

4.4.3 Efecto del control de voltaje en el margen de estabilidad

El análisis modal de las ecuaciones de flujos de potencia en la sección 4.3. sugiere que la aplicación de dispositivos de control de voltaje puede mejorar en forma importante los márgenes de estabilidad del sistema. En la presente sección se hace una comparación del efecto de control de voltaje cuando la carga se representa mediante un modelo dinámico.

Para propósitos de estudio, se asumió, inicialmente, que los CEV se encuentran instalados en los nodos 16, 56 y 87 y se considera que la carga se representa mediante el caso 1, descrito en la Tabla 4.5. Los parámetros utilizados para la representación dinámica de los CEV se resumen en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8
Parámetros de CEV utilizados en el estudio

Ubicación de CEV	K_{cev}	T_{cev}	Q_{Cmax} (MVar)	Q_{Lmax} (MVar)
BUS-16	120	0.040	150	-50
BUS-56	110	0.050	100	-30
BUS-87	100	0.045	30	-20

4.4.3.1 Controlabilidad y observabilidad de los modos críticos

En la Figura 4.15 se muestra el índice de observabilidad para el modo crítico λ_{vj} . El análisis muestra que el modo es fuertemente observable en la región definida por los nodos 27 y 33 y, en menor grado, en los nodos 64 y 68. Estos resultados coinciden con el análisis estático así como con el análisis de factores de participación en la Figura 4.16.

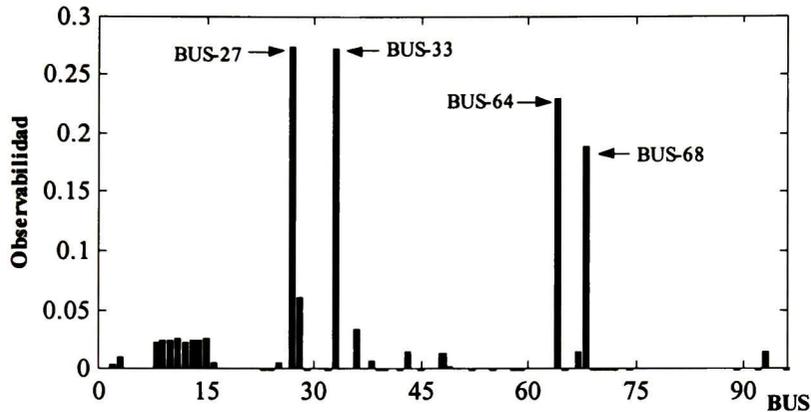


Figura 4.15.- Índices de observabilidad para el modo crítico

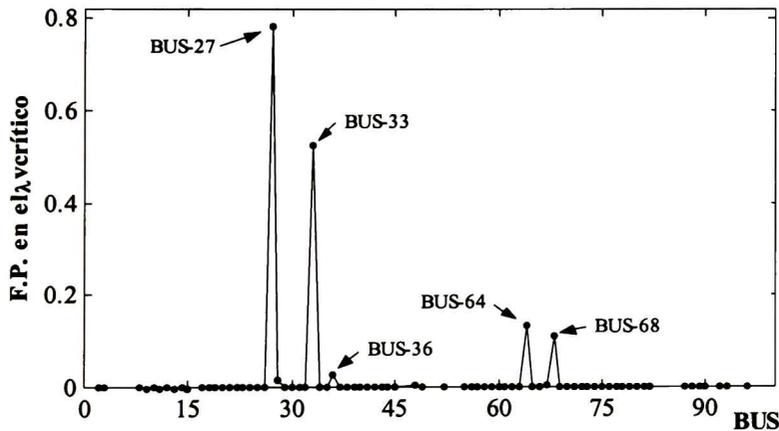


Figura 4.16.- Factores de participación para el modo crítico considerando la inclusión de 3 CEV

Para el modo 2, el estudio de factores de observabilidad en la Figura 4.17 muestra que este modo es fuertemente observable en la región definida alrededor de los nodos 9 y 15. Las zonas geográficas determinadas mediante este análisis para los tres modos críticos se presentan gráficamente en la Figura 4.18. Como se observa, el análisis dinámico permite confirmar que la región definida por los nodos 27 y 33 constituye la zona más vulnerable del sistema. Por otro lado, es importante notar que las zonas asociadas a los modos 2 y 3 descritas en la Tabla 4.9 difieren drásticamente de las regiones determinadas por el análisis estático (refiérase a las figuras 4.11 y 4.18).

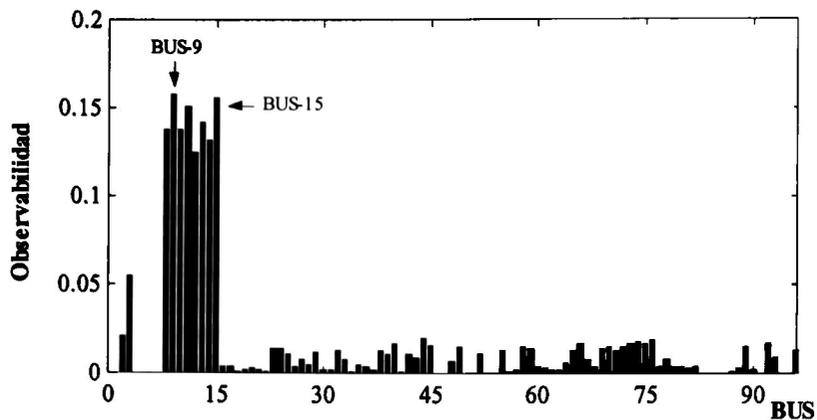


Figura 4.17 .- Factores de observabilidad para el modo 2

Tabla 4.9
Factores de participación nodal considerando la inclusión de CEV

$\lambda_{v1}=-0.0083$		$\lambda_{v2}=-0.0078$		$\lambda_{v3} = -0.0077$	
BUS	F.P	BUS	F.P	BUS	F.P
27	0.783	9	0.647	58	0.144
33	0.525	15	0.543	52	0.088
64	0.133	13	0.539	55	0.084
68	0.109	11	0.497	45	0.074
36	0.026	3	0.101	65	0.057

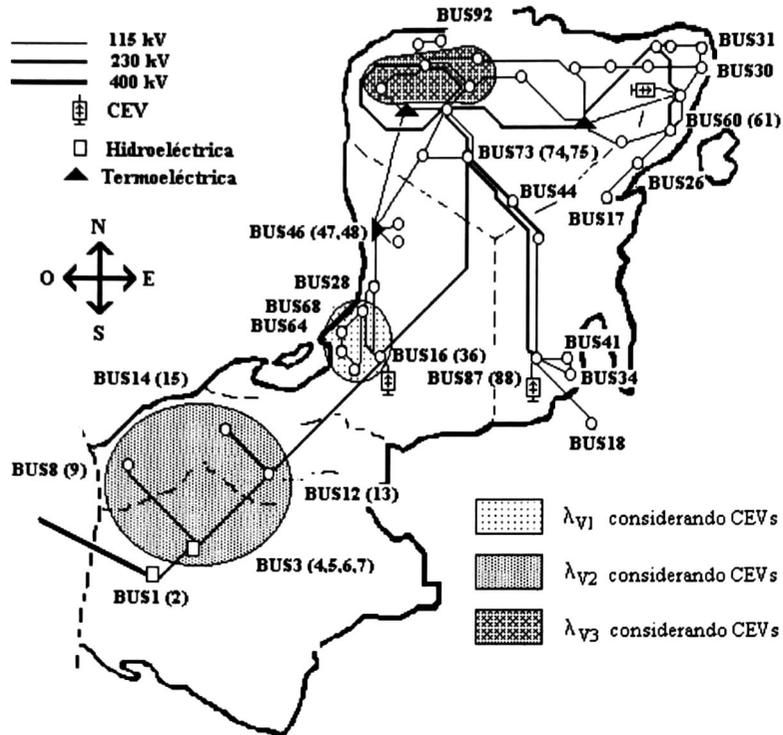


Figura 4.18.- Áreas críticas de voltaje considerando la inclusión de CEV

4.4.3.2 Efecto de la acción de control

Los estudios presentados a continuación se centran en el análisis del efecto de la acción de control en los márgenes de estabilidad, y más concretamente, en el ajuste de los parámetros principales del regulador de voltaje del CEV y la estrategia de control utilizada.

Para permitir una mejor comprensión de los resultados presentados se definen los vectores:

$$\mathbf{x} = [\theta_{d^1}, \dots, \theta_{d^{nd}}, V_{d^1}, \dots, V_{d^{nd}}, \beta_{cev^1}, \dots, \beta_{cev^{nc}}]$$

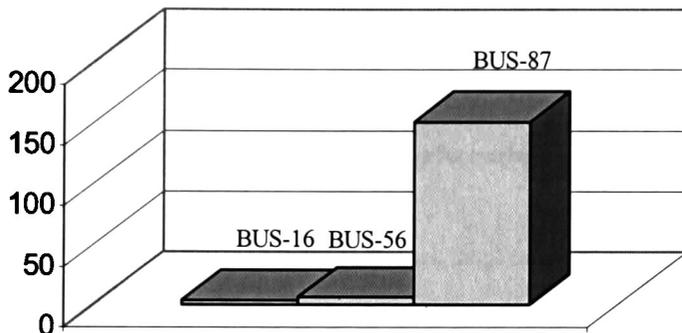
$$\mathbf{u} = [V_{ref^1}, \dots, V_{ref^{nc}}]$$

$$\mathbf{y} = [V_{d^1}, \dots, V_{d^{nd}}]$$

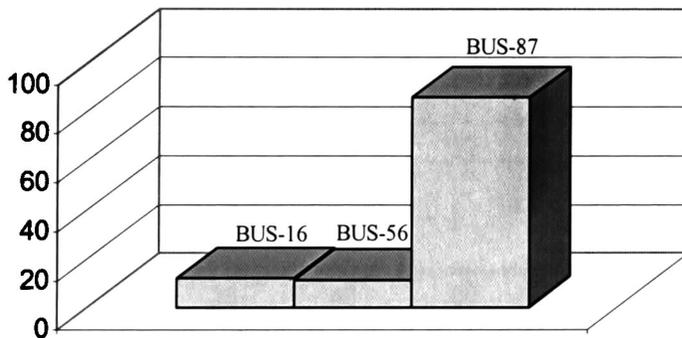
en donde V_{d^i} representa la magnitud de voltaje en el i -ésimo nodo de carga.

En la Figura 4.19, se muestran los factores de controlabilidad de los modos 1 y 2 con respecto a los CEV existentes en el sistema. El análisis de controlabilidad permite comprobar lo siguiente:

- El modo 1 es fuertemente controlable mediante el CEV ubicado en el nodo 87.
- El modo 2 no es controlable mediante el CEV en el nodo 16, ubicado en la vecindad de la zona crítica para este modo (ver Figura 4.18). El análisis sugiere la necesidad de reubicar este dispositivo para aumentar el margen de estabilidad de este modo. El mismo análisis muestra que el CEV ubicado en nodo 87 puede modificar el margen de estabilidad del modo 2.



a) Controlabilidad del modo 1



b) Controlabilidad del modo 2

Figura 4.19.- Índices de controlabilidad para los modos 1 y 2

Con objeto de verificar estas conclusiones se calcularon los residuos de las funciones de transferencia entre los voltajes en terminales de los nodos de carga y los voltajes de referencia de los tres CEV existentes en el sistema. En las figuras 4.20 y 4.21, se muestran

los residuos de la función de transferencia $\frac{\Delta V_{di}}{\Delta V_{refj}}$, $i = 1, \dots, nd$ y $j = 1, \dots, nc$ para los modos

de interés. Como se observa, el análisis sugiere que el CEV en el nodo 16 puede mejorar la estabilidad del modo crítico si se utiliza como señal adicional a la magnitud de voltaje en el nodo 27 ó 33. Se deduce, adicionalmente, que la utilización de un lazo secundario de potencia reactiva en estos CEV permitiría mejorar los márgenes de estabilidad del sistema.

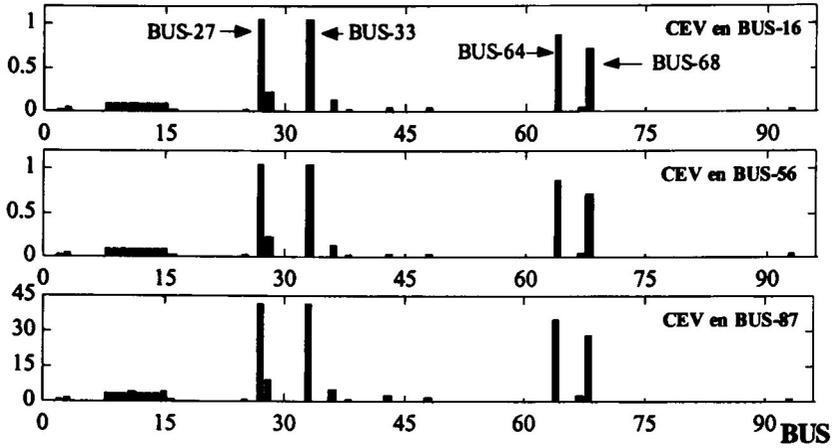


Figura 4.20.- Residuos de la función de transferencia $\frac{\Delta V_{d_i}}{\Delta V_{ref_j}}$ para el modo λ_{v1}

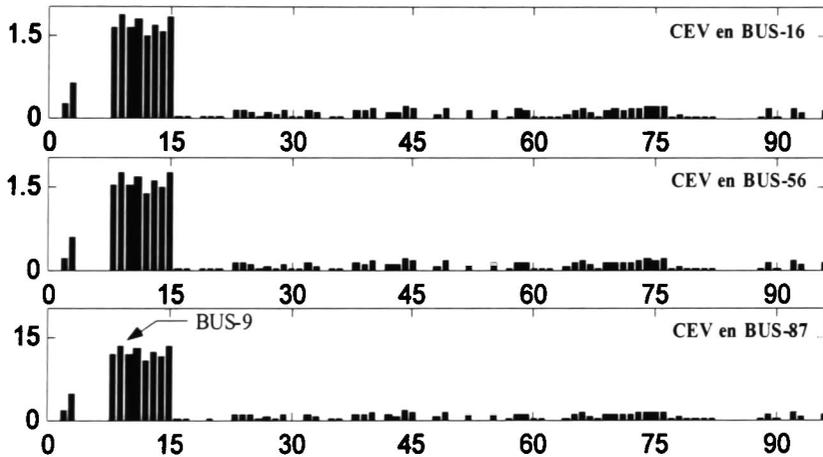


Figura 4.21.- Residuos de la función de transferencia $\frac{\Delta V_{d_i}}{\Delta V_{ref_j}}$ para el modo λ_{v2}

4.4.3.3 Efecto del ajuste en los parámetros de control

Una de las principales limitantes de la técnica de análisis modal aplicada a las ecuaciones de flujos de potencia, es la incapacidad de permitir el estudio del efecto de la estructura y ajuste del lazo de control en el fenómeno de estabilidad.

En la Figura 4.22 se muestra el efecto del ajuste en la ganancia del CEV en el fenómeno de estabilidad de voltaje, considerando dos alternativas de control: valores nominales para las ganancias de los CEV y valores reducidos de éstas para simular una acción de control pequeña. El análisis muestra que la instalación de CEV en los nodos críticos permite un aumento significativo en los márgenes de estabilidad del orden de 7.62%. Se comprueba, asimismo, que la acción de control es más efectiva para condiciones de alta cargabilidad en el sistema.

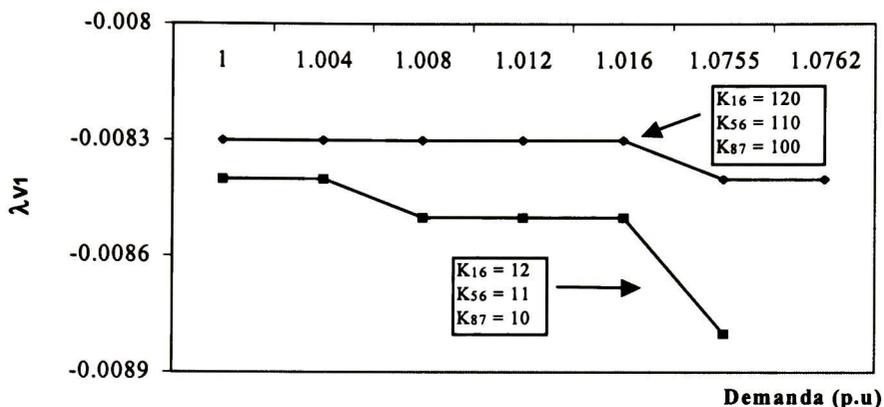


Figura 4.22.- Efecto del control de voltaje en los márgenes de estabilidad del sistema

A continuación, se discute la importancia de la estrategia de control utilizada en los dispositivos de control para mejorar los márgenes de estabilidad del sistema.

4.4.4 Comparación con la aplicación de STATCOM

Con objeto de investigar la importancia del efecto de soporte de potencia reactiva en los márgenes de estabilidad, se presenta un estudio comparativo de la aplicación de un STATCOM y un CEV. Mediante consideraciones apropiadas, sin embargo, los estudios presentados, pueden también interpretarse en el contexto de la modificación del lazo de control del CEV para extender su rango de operación en la región de bajo voltaje.

Para propósitos de estudio, se adoptaron las siguientes consideraciones de modelado: a) En cada condición de operación, el STATCOM se simuló de acuerdo a su característica I-V y b) el comportamiento dinámico se simuló considerando la característica de control propuesta en el capítulo 3.

En la Figura 4.23 se muestra la característica de control utilizada en los estudios. Para propósitos de análisis, la característica de control del STATCOM en la región de bajo voltaje así como la representación equivalente en estudios de flujos de potencia se determinaron mediante la relación:

$$X_{eq} = \frac{V_t}{I_{C_{max}}}$$

en donde I_{Cmax} es la corriente máxima nominal del STATCOM; el voltaje mínimo considerado en éste análisis es de 0.80 p.u.

El efecto de la aplicación de este dispositivo en los márgenes de estabilidad se puede ver en la Figura 4.24, considerando que el CEV en el BUS-87 fue reemplazado por un STATCOM. El estudio permite comprobar que la contribución de potencia reactiva en la zona de operación de bajo voltaje de estos dispositivos permite un aumento marginal en el límite de estabilidad ante disturbios pequeños.

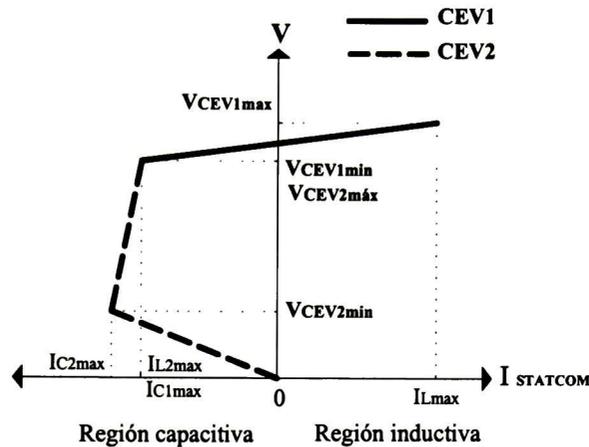


Figura 4.23.- Característica de control utilizada en la representación del STATCOM

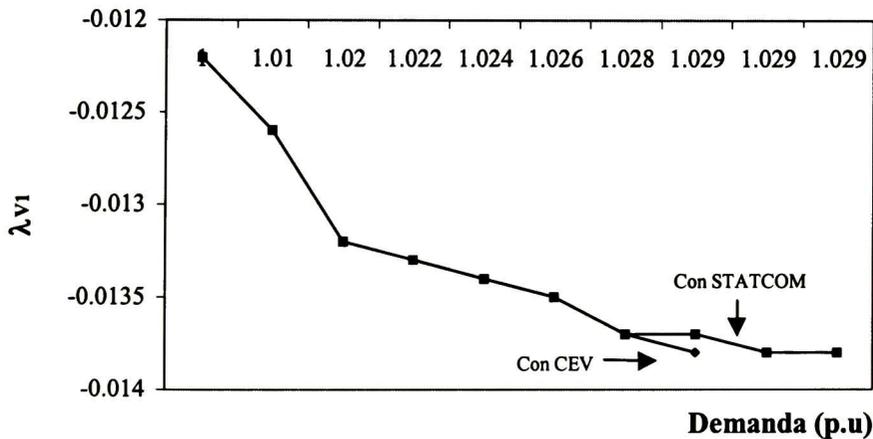


Figura 4.24.- Curva λ_{v1} – demanda considerando compensación en el nodo BUS-87

Por último, en la Figura 4.25 se compara la curva voltaje-demanda para el caso de un CEV y un STATCOM. Como se observa, la aplicación de éste último permite un mejor perfil de voltaje y un aumento perceptible en la cargabilidad del sistema. Obsérvese que la condición de máxima cargabilidad se obtiene para la última condición de flujo de potencia para la que se logra convergencia.

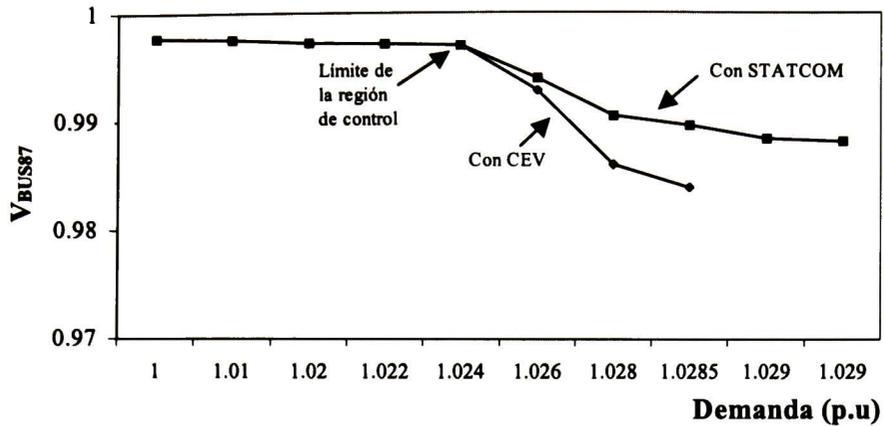


Figura 4.25 .- Curvas demanda – V en el nodo BUS-87, considerando compensación de potencia reactiva

En este capítulo se ha aplicado a un sistema con características reales la metodología desarrollada en los capítulos anteriores. Se ha mostrado como el límite de estabilidad ésta determinado por una bifurcación de tipo singular inducida. Asimismo, se pudo comprobar la importancia que tiene sobre la estabilidad de voltaje de un sistema la característica de los compensadores en la región de voltaje bajo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES GENERALES

El trabajo de investigación que se aborda en esta tesis se ha centrado en el desarrollo de una metodología de modelado que permite representar de manera apropiada el fenómeno de inestabilidad de voltaje en el mediano y largo plazo, con un énfasis en la inclusión de las características dinámicas de la carga y dispositivos de control de voltaje.

Se demostró que el límite de estabilidad esta asociado a una bifurcación de uno de los valores propios, dicha bifurcación puede ser tipo silla o singular inducida, dependiendo de los parámetros de la carga.

El análisis del modelo presentado permite establecer que el límite de estabilidad es determinado en gran medida por los coeficientes de estado estable y transitorio de la carga, los tiempos de recuperación de la carga no tienen influencia sobre el límite de estabilidad.

Se demostró que con el propósito de mejorar la estabilidad de voltaje de una red eléctrica el STATCOM presenta mejores características que el compensador estático.

El modelo propuesto en este trabajo permite identificar las áreas críticas asociadas a voltaje. Asimismo, es posible determinar mediante el análisis de residuos cual de los compensadores presentes en el sistema es el más apropiado para amortiguar a los modos más débiles asociados a magnitud de voltaje.

Algunas de las desventajas del modelo dinámico propuesto es la necesidad de obtener mediante pruebas de campo los parámetros contenidos en el modelo de la carga. El tiempo computacional requerido para analizar a un sistema utilizando el modelo dinámico de pequeña señal es mayor que el utilizado al aplicar técnicas de análisis de la matriz Jacobiana de flujos de carga.

5.2 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

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

- Incluir en el modelo desarrollado las características dinámicas de los generadores.
- Debido a la naturaleza del fenómeno de inestabilidad de voltaje es necesarios el uso de técnicas no lineales para su estudio.

REFERENCIAS

- [1] Michele Brucoli, Federico Rossi, Francesco Torelli and Michele Trovato, "*Generalized Approach to the Analysis of voltage Stability in Electric Power Systems*", Electric Power Systems Research, 9 (1985).
- [2] G. Durga, Mubarak A. Al-Mulhim, G. D. Ray and B. Gopichand, "*Comparative assessment of the effect of dynamic load models on voltage stability*", Electrical Power and Energy systems, Vol. 19, No. 5, 1997.
- [3] P. Kundur, "*Power System Stability and Control*", Mc. Graw Hill.
- [4] X. Vieira, N. Martins, "*Tools for voltage stability analysis, including a probabilistic approach*", IV Symposium of specialists in electric operational and expansion planning, May 23-27 1994.
- [5] Per-Anders Lof, David J Hill, Stefan Arnborg, Goran Andersson, "*On the analysis of long-term voltage stability*", Electrical Power & Energy Systems, Vol. 15, No. 4, 1993, pp. 229-237.
- [6] R. Adapa, K. Madajewski and M. Sobierajski, "*The study of voltage problem in Polish power system*", Power Engineering Society, Winter Meeting, 2000.IEEE, Volume 3, pp. 1733-1738.
- [7] C. D. Vournas, G. A. Manos, J. Kabouris and T. Van Cutsem, "*Analysis of a voltage instability in the Greek power system*", Power Engineering Society, Winter Meeting, 2000.IEEE, Volume 2, pp. 1483-1488.
- [8] Voltage Collapse mitigation, Report to IEEE Power System Relaying Committee, Final Version, December 1996.
- [9] S. Ahmed-Zaid, M. Taleb, "*Structural modeling of small and large induction motors using integral manifolds*", IEEE Trans. Vol. EC-6, 1991, pp. 529-535.
- [10] E. Vaahedi, M.A. El-Kady, J.A. Libaque-Esaine, V.F. Carvalho, "*Load models for large-scale stability studies from end-use consumption*" IEEE Trans. PWR , Nov. 87, pp. 864-872.
- [11] P-A. Lof and D. J. Hill, "*Voltage stability indices for stressed power systems*", IEEE/PES , Winter Meeting, New York, January 26-30, 1992.
- [12] M. K. Pal, "*Voltage Stability: analysis needs, modelling requirement, and modelling adequacy*", IEE Proceedings-C, Vol. 140, No. 4, July 1993.
- [13] D. J. Hill, I. A. Hiskens and D. H. Popovic, "*Stability analysis of power system loads with recovery dynamics*", Electric Power and Energy Systems, Vol. 16, No. 4, 1994.

- [14] T. J. Overbye, " *Effects of load modelling on analysis of power system voltage stability* ", Electrical Power and Energy systems, Vol. 16, No. 5, 1994.
- [15] Wilsun Xu and Yakout Mansour, " *Voltage stability analysis using generic dynamic load models* ", IEEE Transactions on Power systems, Vol. 9, No. 1, February 1994.
- [16] T.T. Nguyen, H.X. Bui, " *Neural network dynamic load model* ", Proc. Of Expert System Application to Power Systems IV, Melbourne , Australia, 1993, pp. 467-472.
- [17] Thierry Van Cutsem, Costas Vournas, Voltage Stability of Electric Power Systems, Power Electronics and Power Systems Series, 1998, Kluwer Academic Publishers.
- [18] Y. G. Zeng, A. Berizzi and P. Marannino, " *Voltage stability analysis considering dynamic load model* ", 4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-97, Hong Kong, November 1997.
- [19] Ian Dobson, Hsiao-Dong Chiang, " *Towards a theory of voltage collapse in electric power systems* ", Systems and Control Letters 13 (1989) 253-262.
- [20] Daniel Karlsson and David J. Hill, " *Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems* ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, February 1994.
- [21] P. Ju, E. Handschin and C. Rehtanz, " *A comparative study on the nonlinear dynamic load models* " 12th Power Systems Computation Conference.
- [22] Ramón Octavio Jiménez Betancourt, " *Análisis de estabilidad de voltaje en estado estable mediante técnicas de análisis modal* ", Tesis de Maestría, CINVESTAV Unidad Guadalajara, Septiembre de 1999.
- [23] W. Xu, E. Vaahedi, Y. Mansour and J. Tamby, " *Voltage stability load parameter determination from field tests on B.C. Hydro's System* " IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 3, August 1997.
- [24] E. Bompard, E. Carpaneto, G. Chicco and R. Napoli, " *A dynamic interpretation of the load-flow Jacobian singularity for voltage stability analysis* " Electric Power and Energy Sytems, Vol. 18, No. 6, 1996.
- [25] Hiroshi Y., Toshiaki S., Michiharu T., Katsuhiko M., Isao I., John P. Y Gregory F., " *Study of a STATCOM applications for voltage stability evaluated by dynamics PV curves and time simulations* " Power Engineering Society, Winter Meeting, 2000.IEEE, Volume 2, pp. 1471-1476.
- [26] A. Borghetti, R. Caldon and C. A. Nucci, " *Generic dynamic load model in long term voltage stability studies* ", Electrical Power and Energy systems 22 (2000).

- [27] IEEE Special Stability Controls Working Group, "*Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, February 1994, pp 229-240.
- [28] Guillermo Galicia Cano, "*Análisis de la estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos de potencia empleando la técnica del mínimo valor singular*", Tesis de Maestría, ESIME-IPN, Agosto 1999.
- [29] Marco A. Pérez, "*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 de Maestría, CINVESTAV Unidad Guadalajara, Mayo 2001.
- [30] Horacio Tovar, "*Investigación de la aplicación del Método de Newton a la Solución de Estudios de Flujos de Potencia*" Tesis de Maestría, ESIME-IPN, 15 de Septiembre de 1989.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN 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: "Análisis de estabilidad de voltaje considerando las características dinámicas de la carga y dispositivos de control de voltaje" que presenta el C. Enrique Hernández Alvarez el día 4 de Octubre de 2001.

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

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

Dr. José Horacio Tovar Hernández
Profesor Investigador
Programa de Graduados e
Investigación en Ingeniería Eléctrica
Instituto Tecnológico de Morelia
Morelia, Michoacán.



CINVESTAV
BIBLIOTECA CENTRAL



SSIT000003904