

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ELEMENTOS CUPP EN SISTEMAS ELECTRICOS PARA EL CONTROL  
GENERALIZADO DE FLUJOS DE POTENCIA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA  
CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

PRESENTA

ALFONSO LOPEZ DELGADO

CD. UNIVERSITARIA

NOVIEMBRE DE 1998





1020124449



# UANL

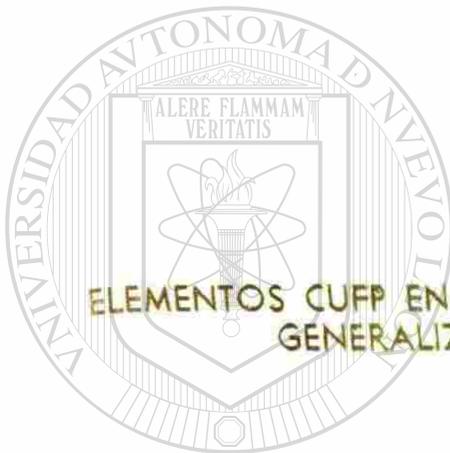
---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ELEMENTOS CUFP EN SISTEMAS ELECTRICOS PARA EL CONTROL  
GENERALIZADO DE FLUJOS DE POTENCIA

TESIS

UANL

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA ®  
DIRECCIÓN ESPECIALIDAD EN POTENCIAS

PRESENTA

ALFONSO LOPEZ DELGADO

CD. UNIVERSITARIA

NOVIEMBRE DE 1998

0129-80360

TM  
25853  
.M2  
FIME  
1998  
L663



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



**FONDO  
TESIS**

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



TRABAJO DE INVESTIGACION CUPP EN SISTEMAS ELECTRICOS PARA EL CONTROL  
GENERALIZADO DE FLUJOS DE POTENCIA

TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
INGENIERO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS  
CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

PRESENTA  
ALFONSO LOPEZ DELGADO

CD. UNIVERSITARIA

NOVIEMBRE DE 1998

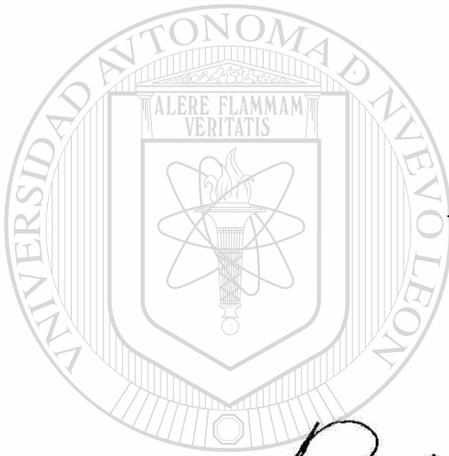
**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Los miembros del Comité de tesis recomendamos que la tesis **ELEMENTOS CUPP EN SISTEMAS ELECTRICOS PARA EL CONTROL GENERALIZADO DE FLUJOS DE POTENCIA** realizada por el Ing. Alfonso López Delgado sea aceptada para su defensa como opción al Grado de Maestro en ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Potencia.

El Comité de Tesis



Asesor  
Dr. Salvador Acha Daza

Coasesor

Dr. Rogelio Ramírez Barradas

Coasesor

Dr. Armando Llamas Terrés <sup>®</sup>

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Vo. Bo.

M. C. Roberto Villarreal Garza  
División de Estudios de Posgrado

Monterrey, N. L., Noviembre de 1998

Agradezco a Dios por permitir mi existencia y mi salud.

Con respeto y amor a mi madre:

**Alicia López Delgado.**

Por ese apoyo incondicional, por guiarme siempre por el camino del bien, por esa unión familiar que siempre ha existido con mis hermanos **José Antonio, Fco. Javier, Pedro, Silvio y Yara del Milagro.**

Con amor y cariño a mi esposa e hija:

**Adriana Obregón Garza y Vanessa López Obregón.**

Por su amor, comprensión, paciencia y ayuda para el logro obtenido, por confiar en mi esfuerzo. Por darme ánimo de no retroceder y seguir adelante.

A mi tío **Inocencio Alvarez Hernández.**

Por sus consejos y apoyo incondicional.

---

A los familiares de mi esposa por su apoyo en los momentos adecuados.

A Sra. **Margarita Reyna.**

Por la ayuda que siempre me profesó y por sus oraciones.

## AGRADECIMIENTOS

Al **Dr. Salvador Acha Daza** por la excelente asesoría en la realización de este trabajo de tesis.

A los catedráticos del Programa Doctoral: **Dr. Florencio Aboytes García, Dr. Oscar L. Chacón Mondragón, Dr. Héctor J. Altuve Ferrer, Dr. Ernesto Vázquez Martínez, Dr. Juan Manuel Ramírez Arredondo.** Por brindarme la oportunidad de aprender un poco más al apoyarme en los estudios de maestría.

A todos y a cada uno de mis compañeros del Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica por su amistad y apoyo, en especialmente a los Ingenieros: **Ramón H. Huereca Leyva, Víctor García Sosa y Manuel Ley Mendoza.**

A la **Universidad Autónoma de Nuevo León.**

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Un agradecimiento especial al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por el apoyo económico brindado para la realización de esta investigación.

## RESUMEN

### ELEMENTOS CUFP EN SISTEMAS ELECTRICOS PARA EL CONTROL GENERALIZADO DE FLUJOS DE POTENCIA

Publicación No. \_\_\_\_\_

Alfonso López Delgado, M. C. En Ingeniería Eléctrica  
Universidad Autónoma de Nuevo León, 1998

Profesor Asesor: Dr. Salvador Acha Daza

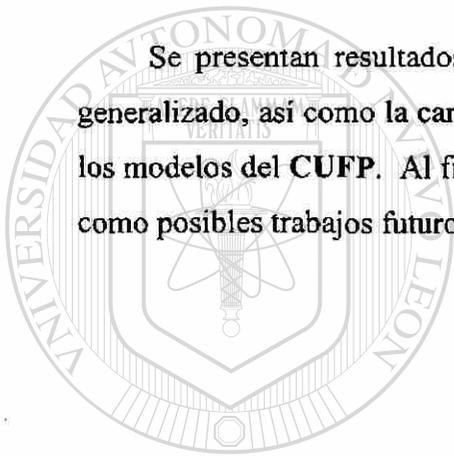
Este trabajo presenta el análisis de una alternativa para controlar la transmisión de energía eléctrica en un sistema de potencia moderno. Se presentan dos modelos de un dispositivo basado en electrónica de potencia que permiten controlar las variables que definen el flujo de potencia en una red eléctrica. El control estudiado pertenece a la familia de los **FACTS** (Flexible AC Transmission Systems). Este dispositivo es de acción rápida para controlar las variables de interés, dando gran flexibilidad al sistema de transmisión, con lo que se mejora la seguridad operativa del sistema de potencia. Especialmente se modela el **CUFP** (Control Unificado de Flujo de Potencia) de dos maneras: el modelo **CUFP** completo y el modelo **CUFP** simplificado. Ambos modelos logran el objetivo de permitir el estudio, con diferente grado de detalle, del control del flujo de potencia por la línea en donde se instala el equipo.

La distribución de los flujos de potencia en un sistema eléctrico depende principalmente de la localización de las cargas y de los factores de sensibilidad respecto de las variables del sistema, por este motivo se realiza un estudio de sensibilidad del sistema bajo análisis a fin de localizar la mejor ubicación del equipo de control en el sistema. Las cargas se modelan como potencia constante por ser el efecto más drástico en un estudio de flujo de potencia. Los modelos del **CUFP** se integran al algoritmo de solución convencional de flujos en su

formulación polar por el método de Newton-Raphson, obteniendo voltajes nodales (magnitud y ángulo), así como voltajes del equipo que se adiciona al sistema.

En este trabajo los valores iniciales para arrancar el proceso iterativo del estudio de flujos, y que corresponden a variables relacionadas con el equipo, se calculan al rededor de un punto de operación. También se establece de antemano el flujo de potencia que se desea fluya en la línea donde se encuentra el CUF, lo cual se hace para los dos modelos propuestos. Se presentan resultados de simulaciones en computadora digital, incluyendo los modelos en el sistema de prueba de 14 nodos del IEEE.

Se presentan resultados de ambos modelos, y se muestra la efectividad del control generalizado, así como la característica de convergencia del proceso iterativo al implementar los modelos del CUF. Al final de la tesis se presentan conclusiones y recomendaciones, así como posibles trabajos futuros en esta dirección.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

# INDICE

<b>Resumen</b> .....	iv
<b>Indice de Figuras</b> .....	ix
<b>Indice de Tablas</b> .....	x

## 1. INTRODUCCION

1.1 Problemática operativa actual de los sistemas de potencia. ....	1
1.2 Objetivos de la tesis .....	4
1.3 Estructura del Trabajo .....	5

## 2. ANTECEDENTES TECNICOS E IMPACTO DE LOS FACTS EN REDES DE TRANSMISION

2.1 Introducción .....	8
2.2 Definiciones .....	9
2.2.1 FACTS .....	9
2.2.2 FACTS en derivación .....	9
2.2.3 FACTS en serie .....	10
2.2.4 FACTS serie-paralelo (mixto) .....	11
2.3 Aplicaciones .....	12
2.4 Equipo FACTS estudiado en este trabajo. ....	15
2.5 Conclusiones. ....	20

## 3. MODELADO DEL CUF, CONTROL UNIFICADO DE FLUJO DE POTENCIA

3.1 Introducción .....	22
3.2 Características del CUF (Control Unificado de Flujo de Potencia) .....	23
3.3 Modelo completo del CUF .....	24
3.3.1 Deducción de ecuaciones. ....	24

## INDICE (Continuación)

3.4	Modelo simplificado del CUFP .....	28
3.4.1	Deducción de ecuaciones .....	29
3.5	Condiciones iniciales .....	30
3.6	Consideraciones y observaciones respecto a modelos del CUFP .....	32

### 4. ANALISIS DE SENSITIVIDAD Y LOCALIZACION EFECTIVA DE CONTROLES EN REDES ELECTRICAS

4.1	Introducción .....	33
4.2	Elemento generalizado de transmisión .....	34
4.2.1	Forma incremental y modelo linealizado para potencia real .....	36
4.2.2	Forma incremental y modelo linealizado para potencia reactiva ...	37
4.3	Obtención de matriz de sensibilidad del sistema de 14 nodos del IEEE. ...	38
4.3.1	Obtención de matriz de sensibilidad para potencia real .....	38
4.3.2	Obtención de matriz de sensibilidad para potencia reactiva-voltaje.	43
4.4	Conclusiones .....	48

### 5. MODELOS DE ESTADO ESTABLE DEL CUFP EN REDES ELECTRICAS DE POTENCIA

5.1	Introducción .....	50
5.2	Sistema eléctrico de prueba .....	50
5.3	Resultados del sistema sin incluir el CUFP .....	52
5.4	Resultados del sistema con el CUFP, modelo completo .....	55
5.5	Resultados del sistema con el CUFP, modelo simplificado .....	59
5.6	Característica de convergencia del proceso iterativo .....	61
5.7	Conclusiones .....	63

## INDICE (Continuación)

### 6. ANALISIS DE RESULTADOS

6.1	Introducción .....	65
6.2	Análisis de resultados. ....	66
6.2.1	Análisis de resultados sin el CUFPP .....	66
6.2.2	Análisis de resultados considerando el modelo completo .....	67
6.2.3	Análisis de resultados, modelo simplificado. ....	67
6.3	Comentarios sobre los resultados analizados .....	68
6.4	Observaciones generales .....	70

### 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1	Introducción .....	72
7.2	Conclusiones generales .....	72
7.2.1	Conclusiones para el modelo completo .....	73
7.2.2	Conclusiones para el modelo simplificado .....	74
7.3	Aportaciones del trabajo de investigación. ....	75
7.4	Recomendaciones para trabajos futuros .....	76

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN 77

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## Índice de Figuras

Página

2.1	Diagrama de conexión del <b>CUFP</b> (Control Unificado de Flujo de Potencia). . . . .	19
2.2	Diagrama fasorial general. . . . .	20
3.1	Circuito equivalente del <b>CUFP</b> . . . . .	24
3.2	Representación de línea de transmisión con un <b>CUFP</b> . . . . .	29
4.1	Elemento generalizado de transmisión. . . . .	35
4.2	Elemento linealizado de transmisión de potencia real. . . . .	36
4.3	Elemento linealizado de transmisión de potencia reactiva. . . . .	37
4.4	Sistema de prueba IEEE de 14 nodos, forma incremental de potencia real. . . . .	39
4.5	Sistema de prueba IEEE de 14 nodos, forma incremental de potencia reactiva. . . . .	44
5.1	Sistema de prueba 14 nodos del IEEE. . . . .	52
5.2	Circuito equivalente del equipo en la línea con el nodo ficticio (modelo completo)	56
5.3	Circuito equivalente del equipo en la línea con el nodo ficticio (modelo simplificado)	59
6.1	Balace de potencia de los nodos 9 y 14. . . . .	66
6.2	Representación del flujo de potencia por la línea y equipo (modelo completo). . . . .	67
6.3	Representación del flujo de potencia por la línea y equipo (modelo simplificado). . . . .	68

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## Índice de Tablas

Página

2.1	Instalaciones con proyectos de dispositivos FACTS. . . . .	14
4.1	Sensitividad de flujo de potencia real en la línea respecto del control defasador. . .	42
4.2	Sensitividad de flujo de potencia reactiva en la línea respecto del control de voltage "inyectado" en línea. . . . .	47
5.1	Datos del sistema de 14 nodos del IEEE . . . . .	51
5.2	Datos de transformadores, sistema de 14 nodos del IEEE. . . . .	51
5.3	Voltajes y ángulos nodales . . . . .	53
5.4	Flujo de potencias en las líneas del sistema de 14 nodos del IEEE. . . . .	54
5.5	Flujo de potencias en transformadores . . . . .	54
5.6	Voltajes y ángulos nodales. . . . .	57
5.7	Flujo de potencia en líneas. . . . .	58
5.8	Flujo de potencia en transformadores. . . . .	57
5.9	Voltajes y ángulos nodales. . . . .	60
5.10	Flujo de potencia real y reactiva en líneas del SEP. . . . .	61
5.11	Flujo de potencia en transformadores. . . . .	60
5.12	Convergencia del sistema al localizar el CUPP en diferentes líneas . . . . .	62
5.13	Valor de potencia real y reactiva al obtener solución en el menor número de iteraciones. . . . .	63

# CAPITULO 1

## INTRODUCCION

### 1.1 PROBLEMATICA OPERATIVA ACTUAL DE LOS SISTEMAS DE POTENCIA

En la actualidad los sistemas eléctricos de potencia son de configuración compleja y pueden ser autosuficientes en sus requerimientos energéticos, o bien manejar contratos de importación y exportación de energía de una región eléctrica a otra. Pero se piensa que en un futuro no lejano, con el aumento cada vez más acelerado de la demanda en los centros de consumo de energía eléctrica, provocará que algunas líneas de transmisión y enlaces importantes pueden llegar a sobrecargarse como consecuencia de que los centros de generación normalmente están alejados de los centros de consumo. Esta lejanía es importante considerarla durante la operación y el control del sistema de potencia y se relaciona en términos eléctricos, ya que la distancia eléctrica entre dos puntos está relacionada con la impedancia equivalente entre dichos puntos. La distancia eléctrica se relaciona con la impedancia equivalente, y al tener grandes flujos de potencia se provoca caídas de tensión en los nodos del sistema, así como un mayor requerimiento de potencia reactiva en las líneas, dependiendo de las condiciones operativas.

El flujo en las líneas responde de manera natural a leyes físicas, así el flujo es inversamente proporcional a la impedancia de la línea, lo cual indica que líneas con menor distancia eléctrica transmiten un mayor flujo de potencia eléctrica y líneas con mayor distancia eléctrica transmiten una potencia menor. No todas las líneas de transmisión tienen las mismas características y no todos los patrones de demanda establecen flujos iguales, también las demandas de las diferentes regiones geográficas establecen diferencias, y existe por tanto una gran variabilidad en los flujos de potencia del sistema y algunas líneas de transmisión trabajan normalmente cargadas, otras tienen poca carga y otras manejan carga cercana a sus límites operativos. Toda esta variación provoca el tener ciertas diferencias de

voltaje en los nodos del sistema y diferencias angulares significativas en los mismos.

En los últimos años la demanda creciente de los consumidores de energía sobre los sistemas eléctricos ha creado incertidumbre en la planificación del sistema adicionando los siguientes factores [4]:

- Una creciente oposición a la construcción y puesta en servicio de nuevas líneas de transmisión; sobre todo en áreas cercanas a las grandes ciudades.
- La creciente participación de esquemas de co-generación en la producción de energía eléctrica.
  - La tendencia a cambiar la organización tipo monopolio de las empresas eléctricas nacionales por compañías privadas, formando mercados abiertos de energía y a segregar los servicios de generación, de transmisión y de distribución de la energía.
  - El nuevo clima regulatorio/político en la industria eléctrica.

Los efectos y problemas más comunes que causan estos factores sobre el sistema de potencia pueden repercutir en problemas operativos y en el planeamiento del sistema, dentro de los cuales se puede mencionar:

- Problemas de estabilidad.
- Flujos de potencia por trayectorias no deseadas.
- Limitación para utilizar al máximo la capacidad de los conductores.
- Flujos de potencia reactiva no deseados en las líneas.
- Voltajes nodales fuera de márgenes operativos aceptables.
- Defasamiento angulares demasiados grandes.
- Problemas sobre los elementos de control y/o de protección (relevadores), debido a fenómenos en cascada y tiempos excesivos para lograr la restauración del sistema en caso de colapso.

Lo anterior obliga a diseñar sistemas de transmisión más eficientes, utilizando dispositivos adecuados que permitan su explotación a plena capacidad, que permitan suministrar cargas crecientes sin sacrificar la seguridad del sistema y la confiabilidad del suministro, además de reducir las pérdidas de transmisión.

Con el acelerado desarrollo de la tecnología eléctrica, en conjunción con la electrónica de potencia, se han diseñado aplicaciones para los sistemas eléctricos de potencia a fin de tener control sobre todos los parámetros de elementos de un sistema. El control de flujo de potencia real o de potencia reactiva, la magnitud de voltaje y los ángulos nodales, se puede lograr con equipos que funcionan como compensadores de potencia reactiva en conexión serie, compensadores de potencia reactiva en paralelo (shunt o derivación), transformadores defasadores o cambiadores de derivaciones en transformadores y otros equipos compensadores de operación mixta o que combinan la configuración serie-paralelo.

Los semiconductores han revolucionado los sistemas de control, así como su confiabilidad por su larga vida operativa, siempre y cuando se trabajen dentro de límites establecidos. Estos elementos han hecho posible la fabricación de equipos con una respuesta rápida, alta confiabilidad y que requieren poco mantenimiento, dando con ello una gran flexibilidad operativa y de control al sistema eléctrico. Por estas causas los equipos reciben el nombre de Sistemas de Transmisión Flexible en CA (**FACTS**). La palabra **FACTS** engloba a todos los equipos compensadores de potencia reactiva, así como también a los transformadores defasadores y cambiadores de derivación.

El nombre de **FACTS** fue utilizado por primera vez en una publicación del EPRI de 1986, después en una reunión de verano del IEEE en 1987 en la ciudad de San Francisco, California, y en la American Power Conference de 1988, por N. G. HINGORANI [26, 9]. El objetivo principal de los equipos de compensación tipo **FACTS** es minimizar las variaciones de voltaje o de manera directa controlar los parámetros que determinan el flujo de potencia, bajo condiciones de estado estable o durante cambios lentos en la demanda. Los problemas dinámicos, principalmente los de estabilidad transitoria del sistema, se manejan con conexión

o desconexión de varios equipos y/o elementos para controlar las variables eléctricas en sus excursiones dinámicas, y de esta forma lograr márgenes operativos amplios para asegurar una recuperación positiva de la estabilidad del sistema; en donde la causa primaria del problema pudo ser ocasionada por salida de generadores, desconexión de líneas o bien por fallas en equipos eléctricos [2].

El auge de desarrollo en los equipos tipo **FACTS** ha sido mayor al separarse los sistemas eléctricos en diferentes compañías, impulsada esta tendencia por la desregulación. Las áreas eléctricas nuevas así formadas y que antes se controlaban de manera independiente, pero con enlaces entre sí para exportar energía de una a otra en situaciones de emergencia, y con la necesidad de transmitir una potencia determinada, requieren y buscan instalar dispositivos para controlar efectivamente el flujo por las líneas de enlace. En el pasado reciente se desarrollaron equipos de control, pero que solamente controlan uno de los parámetros de los varios que determinan el flujo de potencia por una línea, como son: el voltaje nodal (magnitud y ángulo) e impedancia de la línea. En la actualidad se están desarrollando equipos que controlan dos o más de estos parámetros, y entre los nuevos equipos está el que se estudia en este trabajo, denominado Control Unificado de Flujo de Potencia (**CUFP**), el cual permite un control completo de flujo de potencia por la línea de transmisión.

---

## 1.2 OBJETIVOS DE LA TESIS

### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El presente trabajo aborda el modelado y el problema de evaluar la efectividad de control de un dispositivo **FACTS** denominado **CUFP**. Se requiere obtener un modelo, para lo cual se proponen dos formas: que se da el nombre de modelo completo y de modelo simplificado, dicho desarrollo se incluye en un procedimiento para resolver flujos de carga por el método de Newton-Raphson en su forma polar, para un sistema eléctrico de potencia. El modelo y el programa digital prototipo se desarrolla en **MATLAB**, y con los resultados obtenidos se comprueba que el equipo cumple con las expectativas establecidas en cuanto a lograr controlar los flujos de potencia y las variables asociadas del sistema de potencia. Con

este objetivo en mente se desarrolló el presente trabajo, alcanzando los siguientes logros:

- El usar modelos para localizar controles y cuantificar su efecto desde el punto de vista del sistema.
- El modelar y el analizar al **CUPF** con factor de potencia diferente al unitario, dentro del sistema eléctrico de potencia.
- El modelar y el analizar al **CUPF** con factor de potencia unitario dentro del sistema eléctrico.
- El comparar el comportamiento de los flujos de potencia y de las magnitudes de voltaje del sistema, sin el uso y con el uso del **CUPF**.
- Analizar la convergencia del proceso iterativo cuando se usan los dos modelos, al colocar el dispositivo **CUPF** en diferentes líneas, a fin de valorar su efecto.

### 1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

La tesis está estructurada en siete capítulos. En el capítulo uno se presenta la introducción general, se elabora las ideas preliminares, y se refiere cuando se usó por vez primera el nombre de **FACTS** y los objetivos principales del presente trabajo.

En el capítulo dos se presentan las definiciones de **FACTS** y del **CUPF**, se dan los antecedentes más importantes y se describen algunos equipos de compensación clasificados como tipo serie, tipo paralelo y/o mixtos. Así mismo se presenta una tabla de referencia acerca de **FACTS** que han sido instalados en diferentes sistemas eléctricos en el mundo, se describe la finalidad y cual es la capacidad de los mismos.

En el capítulo tres se presentan con detalle dos modelos del Control unificado de Flujo de Potencia (**CUPF**). El modelo completo considera un factor de potencia diferente al

unitario para el convertidor en derivación del equipo. Se presentan los esquemas a partir de los cuales se obtienen las ecuaciones del modelo, el cual contempla dos fuentes dependientes de voltaje: una en serie y otra en paralelo. De manera particular el modelo simplificado considera un factor de potencia unitario en el convertidor en derivación del equipo. Se establecen las ecuaciones de potencia y se comenta sobre la estructura que toma el Jacobiano del método de Newton-Raphson, al considerar cada modelo.

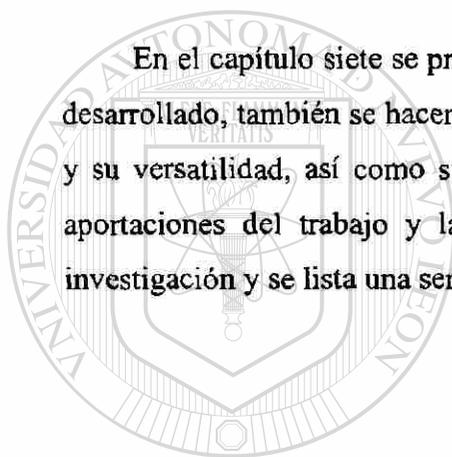
En el capítulo cuatro se presenta un análisis de sensibilidad para el sistema considerado en este trabajo. Se observa de manera cuantitativa el efecto de cambios pequeños de una variable de control sobre las variables dependientes en el sistema. La obtención de la matriz de sensibilidad se logra por una aproximación del tipo método desacoplado rápido [29, 30], pero representando las líneas y el equipo de control como elementos generalizados de transmisión. Se utiliza una forma incremental y el modelo linealizado para estudiar el control de la potencia real y otro modelo para estudiar el control de la potencia reactiva y el voltaje nodal. Se muestra que analizando los valores de los coeficientes de sensibilidad se puede sugerir la localización del equipo FACTS, es decir, en qué parte del sistema pueden proporcionar un control más efectivo y lograr su cometido de manera eficiente.

En el capítulo cinco se presentan los sistemas eléctricos considerados para efectuar los estudios y se establecen los datos de los dos modelos del CUPF. Para un mejor análisis del efecto del CUPF se genera un nodo ficticio a la salida de la fuente serie. Se obtienen resultados de las corridas de flujos de los sistemas de estudio, primeramente sin considerar el equipo para formar el caso base y posteriormente se dan resultados con el equipo CUPF incluido. Los resultados se dan de manera tabular para los voltajes nodales y para los flujos de potencia, considerando el modelo simplificado del CUPF y el modelo completo. La finalidad de estas tablas es la de comparar los voltajes y los flujos obtenidos sin incluir el dispositivo, y el número de iteraciones para lograr convergencia. Al final del capítulo aparece una tabla donde se presentan las iteraciones para alcanzar convergencia cuando se desea controlar la potencia transferida, estableciendo el nuevo valor que debe manejar la línea donde está colocado el CUPF. Las sumas de potencia nodal en los nodos extremos a la línea donde

está conectado el equipo comprueban el balance de potencia que debe lograrse al haber alcanzado la solución mediante el proceso iterativo; lo cual se debe cumplir para los dos modelos propuestos.

En el capítulo seis se presentan la suma de potencias en los nodos extremos a la línea donde está conectado el equipo, de esta forma se comprueba el balance de potencia en los nodos extremos a la línea donde esta el equipo. Este análisis se da para los dos modelos que se trataron en este trabajo, también se hacen observaciones generales del dispositivo de cómo tiene impacto sobre el sistema de transmisión.

En el capítulo siete se presentan conclusiones generales y particulares acerca del trabajo desarrollado, también se hacen observaciones generales sobre el equipo de control tipo CUPP y su versatilidad, así como su impacto sobre el sistema de transmisión. Se establecen las aportaciones del trabajo y las contribuciones principales logradas al realizar la presente investigación y se lista una serie de recomendaciones para trabajos futuros.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## CAPITULO 2

### ANTECEDENTES TECNICOS E IMPACTO DE LOS FACTS EN LAS REDES DE TRANSMISION

#### 2.1 INTRODUCCION

Los límites de transferencia de potencia en un sistema eléctrico pueden ser removidos si se adicionan líneas de transmisión y/o se instala cierta porción de la generación requerida en los centros de consumo, pero estas soluciones requieren de grandes inversiones, lo cual ha provocado que el flujo de potencia se limite por uno o más de los siguientes aspectos [4]:

- Estabilidad
- Flujos circulantes, que pueden causar sobrecarga en líneas de transmisión
- Valores de voltaje fuera de límites aceptables en algunas barras del sistema
- Violación de límite térmico en líneas de transmisión o en equipos

---

Con dispositivos tipo **FACTS** se puede modificar uno o más de los límites anteriores, siempre que sus parámetros estén dentro del margen operativo del equipo. Por su naturaleza operativa los **FACTS** tienen una capacidad de control que justifica su aplicación técnica dentro del sistema eléctrico de potencia y se puede decir que tienen los siguientes atributos generales [3]:

- Respuesta rápida
- Capacidad de variaciones frecuentes en sus variables de salida
- Ajuste suave en las variables de salida

## 2.2 DEFINICIONES

A continuación se presenta una definición del concepto de **FACTS** y de algunos de los equipos más comunes dentro de esta familia y su aplicación a los sistemas eléctricos de potencia. Estas definiciones están dadas según [1, 4].

### 2.2.1 FACTS

#### A. FACTS, Flexible AC Transmisión Systems

Son dispositivos que en un sistema de transmisión en corriente alterna incorporan, con base a la electrónica de potencia y a esquemas de control apropiados, la posibilidad de aumentar la controlabilidad e incrementar la capacidad de transferencia de potencia en el sistema eléctrico [2].

#### B. Controlador basado en FACTS

Es un sistema basado en electrónica de potencia y otros equipos estáticos que proporciona el control de uno o más parámetros de transmisión, en un sistema de corriente alterna.

---

### 2.2.2 FACTS en derivación

#### A. Compensador Estático Sincrónico (CES)

Es un dispositivo que opera como un compensador estático de VARs, el cual está conectado en derivación respecto a la barra donde aporta una corriente que se atrasa o que se adelanta al voltaje y cuyo efecto puede ser controlado, independientemente del voltaje del sistema de corriente alterna.

#### B. Compensador Estático de VARs (CEV)

Es un dispositivo estático con una conexión en derivación, el cual aporta o toma reactivos del sistema de potencia y que puede ser ajustado para intercambiar corriente en adelanto o en atraso, así como también puede mantener o controlar parámetros específicos

del sistema eléctrico de potencia. De manera típica la variable a controlar es el voltaje de la barra local.

### **C. Reactor Controlado por Tiristores (RCT)**

El esquema está formado por una conexión en derivación de una inductancia controlada por tiristores. Bajo esta configuración el efecto reactivo es variado de manera continua por el control de conducción parcial del tiristor.

### **D. Capacitor Switchado por Tiristores (CST)**

Es un capacitor conectado en derivación el cual es conectable o desconectable (switching) por medio de tiristores. La reactancia capacitiva es variada de un sólo paso, de esta manera cuando el tiristor tiene un estado de conducción, la reactancia es cero o bien se dice que existe conducción total.

#### **2.2.3 FACTS en serie**

##### **A. Compensador Síncrono Estático Serie (CSES)**

Es un generador estático síncrono que opera a través de una fuente externa de energía eléctrica, como si se tratara de una compensación serie, pero el voltaje de salida está en cuadratura y proporciona un control independiente para la corriente de línea. El propósito es el incrementar o disminuir totalmente el voltaje cuyo efecto se interpreta que tiene una naturaleza reactiva a través de la línea. De esta forma se puede controlar la potencia eléctrica transmitida. El CSES incluso tiene la posibilidad de almacenar energía rápidamente cuando ocurren procesos transitorios, absorbiendo energía para mejorar el comportamiento dinámico del sistema de potencia, lo cual logra por la compensación temporal de potencia real, incrementando o disminuyendo momentáneamente la potencia total que maneja en la línea.

##### **B. Capacitor Serie Controlado por Tiristores (CSCT)**

Es un dispositivo formado por un reactor y una reactancia capacitiva formada por un banco de capacitores conectados en serie. El valor de la reactancia inductiva que

proporciona el reactor es controlado por tiristores, con lo cual se logra proporcionar una variación suave de la reactancia serie capacitiva del arreglo equivalente.

### **C. Capacitor Serie Switcheable por Tiristores (CSST)**

Está formado por un esquema de compensación de reactancia capacitiva formado por un banco de capacitores en serie, y combinado con un reactor switcheable por tiristores para proporcionar el control de la reactancia serie.

## **2.2.4 FACTS serie-paralelo (mixto)**

### **A. Controlador de Interfaces de Potencia (CIP)**

Es un dispositivo que mejora el flujo de potencia dentro del sistema de CA. Este equipo es usado para mantener un estado estable constante, o flujo de potencia activo de pos-contingencia entre dos nodos en la red. Una conexión serie que controla la potencia activa y la potencia reactiva, para cada fase de una rama consiste de una inductancia y capacitancia sujetas, cada una por separado, a cambiar la fase del voltaje. La potencia activa y la potencia reactiva pueden fijarse independientemente por el ajuste de cambio de fase o de la impedancia de rama usando contactores mecánicos o electrónicos. En el caso particular donde la impedancia inductiva y capacitiva forma un par conjugado, cada terminal del CIP es una fuente de corriente pasiva dependiente del voltaje de la otra terminal.

### **B. Transformador con Cambio de Fase Controlado por Tiristor (TCFCT)**

Es un transformador equipado con cambio de fase, ajustado por tiristores de conmutación para proporcionar una variación rápida del ángulo de fase.

### **C. Control Unificado de Flujo de Potencia (CUFP)**

Es una combinación de Compensador Estático Sincrónico y un Compensador Estático Síncrono tipo Serie, los cuales son acoplados por medio de una conexión común de CD. La configuración permite el flujo en ambas direcciones de la potencia real, o sea entre la terminal serie de salida del Compensador Estático Sincrónico Serie y la terminal de salida del

Compensador Estático Sincrónico (shunt o en derivación). El control establecido puede proporcionar corriente en fase y/o corriente en cuadratura con el voltaje de la línea externa, la cual ha sido compensada en serie por una fuente de energía eléctrica externa. El CUFPP puede "inyectar" un voltaje serie sin restricción angular, y es capaz de controlar en forma completa o selectivamente: el voltaje de la línea de transmisión, la impedancia de la línea, el ángulo de defasamiento del voltaje, el flujo de potencia real y de potencia reactiva en la línea, indistintamente. El CUFPP puede también proporcionar control independiente de compensación reactiva en derivación solamente [1, 4].

### 2.3 APLICACIONES

La aplicación de la electrónica de potencia y en particular de los tiristores con capacidad de manejo de grandes cantidades de energía, a los sistemas de potencia de tipo industrial se presentó en los 70's. En 1977 se reporta en los Estados Unidos la primera aplicación de un CEV para controlar el voltaje en un sistema de transmisión. Se instala un reactor controlado por tiristores (RCT) en la subestación Victory Hill en Nebraska, con el propósito de controlar variaciones de voltaje, tanto en condiciones de estado estable como ante contingencias [4].

Con el avance de la electrónica de potencia, las ventajas técnicas de los equipos de control tomaron un gran impulso, como los CEV del tipo capacitor controlado por tiristores (CCT) los cuales se combinaron con los RCT, dando como resultado un esquema mixto de compensación CCT/RCT. La primera aplicación de este esquema se logró en 1979 en el sistema ESCOM en Sudáfrica, para la corrección de desbalances de voltaje en una red de 132 KV, donde los desbalances eran causados por cargas asimétricas de trenes [4].

En 1991 se tiene en los Estados Unidos tres aplicaciones del Capacitor Serie Controlado por Tiristores (CSCT) y del Capacitor Serie Switchable por Tiristor (CSST). La primera instalación [4] fue esencialmente de naturaleza experimental, para probar el hardware de CSST, una válvula dada por tiristores fue aplicada a través de una fase de un

módulo de capacitores para obtener una compensación serie en la línea de 345 KV Kanawa River - Mat Funk; en la subestación de Kanawa River en el estado de West Virginia.

La segunda instalación [5] incluyó un **CSCT**, el cual consistió de un capacitor fijo derivado por reactor controlado por tiristores, proporcionando una compensación serie capacitiva controlada. Este equipo fue instalado en una línea de 300 Km, de 230 KV en la subestación Kayenta en Arizona. La finalidad de esta aplicación fue la de incrementar la transferencia de potencia de la línea en cuestión, el incrementar el límite térmico y evaluar el esquema del **CSCT**, el cual estaba habilitado para controlar el flujo de potencia y la impedancia de la línea, con la posibilidad de incrementar el amortiguamiento electromecánico de las oscilaciones de potencia, y poder mitigar la resonancia subsíncrona. La tercera instalación se colocó en la subestación Slatt en Oregon, y sólo consiste en un **CSCT** [6]. El **CSCT** de Slatt comprende seis módulos idénticos de **CCT** conectado en serie.

En 1991 una unidad de  $\pm 80$  MVARs fue instalada en la estación de conmutación de Inuyama en Japón [9]. El Compensador Sincrónico Estático (**CSE**) más recientemente instalado tiene una capacidad de  $\pm 100$  MVARs [7] que fue instalado en Noviembre de 1995 en la subestación Sullivan (500 KV -161 KV) en la ciudad de Johnson, Tennessee. Durante el día y para minimizar la activación del cambiador de derivaciones del transformador de 500/161 KV se tiene la operación de  $\pm 100$  MVARs del **CES**, el cual proporciona control de voltaje para la barra de 161 KV. En un futuro el **CES** está pensado que puede proporcionar soporte adecuado de voltaje para el nivel de 500 KV y para el de 161 KV; durante altas demandas pico y para conducción de carga máxima.

La primera instalación a gran escala de un dispositivo tipo **CUFP** consistió de un convertidor de fuente de voltaje en derivación (**CES**) con una capacidad de  $\pm 160$  MVAs para proporcionar  $\pm 150$  MVARs de soporte de potencia reactiva y 50 MW de potencia real a través del encadenamiento de CD, lo cual se requiere en condiciones de operación completa del **CUFP**. El convertidor de fuente de voltaje serie es de  $\pm 160$  MVAs para proporcionar el cambio de fase y/o compensación serie. Ambos, tanto el **CES** como el sistema serie consiste

de una fuente de voltaje de 160 MVAs de pulsos múltiples, las armónicas se neutralizan con el convertidor GTO y las interfaces magnéticas. El CUPP fue instalado en una línea de transmisión de 138 KV en la subestación Inez en Kentucky. La instalación fue planeada para ser terminada a finales de 1997.

La Tabla 1.1 contiene más información [4], que permite complementar la información sobre aplicaciones de dispositivos tipo FACTS en sistemas eléctricos del mundo.

TABLA 2.1  
Instalaciones con Proyectos y Dispositivos FACTS

TIPO	PARTICIPANTE	FECHA	OBJETIVO DEL PROYECTO	NIVEL
SVC*	Varias instalaciones en todo el mundo	desde 1977	Control del voltaje de transmisión, amortiguamiento de oscilaciones de potencia.	Rango dinámico típico de 60 a 600 MVAR.
STATCOM*	California del Sur Edison/EPRI/SIEMENS	1985	Demostración tecnológica	1 MVAR.
TSSC Fase Simple	American Electric Power/ABB	1991	Válvula de prueba	
TCSC Módulo simple*	Western Area Power Administration/Siemens	1992	Control de flujo de potencia Demostración tecnológica	15 $\Omega$ , 1-16.2 KV, 3.3 KA nivel de falla.
TCSC 6-Módulo*	Bonneville Power Administration/Portland, GE, EPRI, General Electric CO.	1993	Control de flujo de potencia, amortiguamiento de oscilaciones y demostración tecnológica.	8 $\Omega$ , 2.9 kA, 26.7 KV/ $\infty$ , 46.4 V/3-seg. 20.8 a nivel de falla.

TCPST Retrofit	Western Area Power Administration/EPRI/Gen eral Electric CO.	1993	Concepto retrofit desarrollado & aplicación para amortiguamiento de oscilaciones de potencia.	
TCPST Núcleo simple	Minnesota Power & Light/EPRI/University of Minnesota/General Electric CO.	1994	Desarrollo de concepto y diseño del hardware	
STATCOM*	Tennessee Valley Authority/EPRI/ Westinghouse (en Sullivan (500 KV/161 KV) en la subestación Johnson City)	1995 Noviem bre	Control de voltaje demostración tecnológica.	±100 MVAR 161 KV
UPFC	Western Area Power Administration/EPRI/ Westinghouse	1996	Control de flujo de potencia y estabilización, estudio del diseño del hardware.	
CUPP	Electricité de France/General Electric Co./GEC-Alsthom	1997	Control de flujo de potencia. Estudio y diseño de hardware	±7 MVAR, 225 KV
STATCOM*	Estación de switcheo Inuyama	1991		±80MVAR

## 2.4 EQUIPO FACTS ESTUDIADO EN ESTE TRABAJO

El equipo estudiado en este trabajo es el **controlador unificado de flujo de potencia o CUPP**. El dispositivo está formado por dos arreglos de compuertas electrónicas en forma de convertidores de switcheo, que en el diseño considerado son inversores de una fuente de

voltaje, usando una compuerta de lazo abierto (GTO). El **CUFP** está compuesto por dos inversores que operan con un acoplamiento común de CD, el acoplamiento es proporcionado por un capacitor en CD que almacena energía. Este arreglo funciona como un convertidor ideal de potencia de CA a CA, en el cual la potencia real puede fluir en ambas direcciones y cada inversor puede proporcionar o absorber potencia reactiva en las mismas terminales de salida de CA. El inversor serie proporciona un potencial de CA controlando de esta manera la magnitud de voltaje y el ángulo de fase en la línea. Esta fuente de potencial puede ser considerada como una fuente de voltaje síncrona de CA, y la corriente de la línea de transmisión fluye a través de esta fuente de voltaje resultando, por tanto, en un intercambio de potencia real y reactiva con el sistema de CA. El inversor en derivación proporciona o absorbe la potencia real que es demandada o bien que regresa el inversor serie a través del acoplamiento común de CD [4, 3, 4, 8].

Para entender el principio de operación del **CUFP** se puede pensar que este equipo es sólo para proporcionar compensación reactiva en derivación. El arreglo **CUFP** requiere un inversor serie y otro en derivación, respecto a la línea de transmisión. El inversor serie es usado para generar un voltaje, de la forma  $V_{pq}(t) = V_{pq} \text{sen}(\omega t - \alpha_{pq})$ , a frecuencia fundamental  $\omega$ , y con amplitud variable en el rango  $0 \leq V_{pq} \leq V_{pq}^{\text{max}}$ ; cuyo ángulo se puede ajustar entre  $0 \leq \alpha_{pq} \leq 2\pi$  radianes. El voltaje  $V_{pq}$  es "inyectado" a la línea a través del transformador de acoplamiento serie, tal que la salida del inversor serie actúa como una fuente de voltaje de CA. Los Volts-Amperes de inyección de la fuente de voltaje que representa al inversor serie son determinados por el producto del voltaje máximo inyectado a la línea y por la corriente máxima que fluye en la línea de potencia [4].

El inversor en derivación es conectado en derivación respecto al sistema de potencia a través de un transformador, y es usado primeramente para proporcionar la potencia real demandada por el inversor serie a través del encadenamiento común de CD. Es importante mencionar que el inversor en derivación proporciona la potencia reactiva que demanda la inyección de voltaje en serie, y por tanto, el sistema de potencia no es cargado por un flujo de potencia reactiva adicional que se requiere por la operación del **CUFP**.

El control interno de los convertidores está estructurado para aceptar señales externas de varias referencias, las cuales pueden ser seleccionadas para la compensación reactiva en derivación, para la compensación serie, para controlar la separación angular de transmisión o bien para controlar el voltaje de envío. Las señales de referencia son usadas en un control de lazo cerrado para forzar al inversor a producir un voltaje de CA en terminales de entrada (conexión en derivación) y en las terminales de salida (conexión en serie), controlando así el flujo de potencia de las terminales, y por lo tanto estableciendo los parámetros de transmisión deseados ( $Q_{ref}$  en la entrada y  $V_{ref}$ ,  $Z_{ref}$  y  $\alpha_{ref}$  en la salida). El control sólo mantiene en el acoplamiento de CD el voltaje necesario y da una transferencia suave para la potencia real entre los dos inversores.

Es importante notar que el esquema del CUFPP presenta una dirección cerrada en la trayectoria de la potencia real manejada por la acción de la inyección del voltaje serie a través del convertidor en derivación y del convertidor serie, así como por la línea. La potencia reactiva intercambiada por el dispositivo es proporcionada o manejada localmente por el inversor serie, y por tanto esto no representa un flujo por la línea de transmisión. Así, el inversor puede ser operado con un factor de potencia unitario, o ser controlado para tener un intercambio de potencia reactiva con el inversor serie, ya que el flujo de potencia reactiva no es continuo por el CUFPP [8].

Al analizar la operación del CUFPP se observa que trabaja como compensador en derivación, o bien como compensador serie y aún permite efectuar un cambio del ángulo de fase; entonces al CUFPP se le considera un controlador múltiple. El objetivo se puede resumir en "inyectar" un voltaje  $V_{pq}$  con amplitud y ángulo de fase variable, respecto al voltaje terminal  $V_o$ , dependiendo tal voltaje  $V_{pq}$  del comportamiento deseado y del control implementado, así por ejemplo:

- i. **Regulación del Voltaje Terminal:** Es como tener el efecto de un CEV en el nodo de envío y lograr un comportamiento similar al que se obtiene con un transformador con cambio de derivaciones, pero con la ventaja de tener el control sobre un paso continuo

del voltaje;  $V_{pq} = \Delta V$  es inyectado en fase o en contrafase a  $V_o$ .

- ii. **Compensación Serie Capacitiva:** Esto se logra si el voltaje  $V_{pq} = V_c$  es inyectado en cuadratura respecto a la corriente de la línea  $I_L$ .
- iii. **Regulación de Ángulo de Transmisión:** El cambio del ángulo de fase, donde  $V_{pq} = V_\alpha$  es "inyectado" con una regulación angular con respecto a  $V_o$ . El control logra el cambio deseado en la fase, tanto en adelanto como en atraso, sin incluir cambio en la magnitud del voltaje.
- iv. **Regulación completa del CUFP:** La regulación simultánea de voltaje terminal, compensación serie con efecto capacitivo y cambio de fase se logra, como puede apreciarse, al analizar la expresión (2.1).

Otras características generales del **CUFP** que se pueden citar: es extremadamente robusto y versátil como concepto de control de flujo de potencia, ya que tiene la capacidad de cambiar prácticamente todos los parámetros de transmisión, afectando simultáneamente el flujo de potencia con una respuesta rápida. Lo anterior indica lo apropiado del dispositivo para aplicaciones que requieren un control de flujo de potencia rápido en estado estable o en bien en estado transitorio, por lo cual se debe evaluar sus posibles efectos benéficos en los problemas de estabilidad transitoria, y para incrementar el amortiguamiento de oscilaciones en los sistemas de potencia.

Las pérdidas del **CUFP** dependen del punto de operación y de la corriente de línea, así como de la frecuencia de conmutación de los convertidores. Si se usa un número apropiado de pulsos (alto) para los inversores del **CUFP**, la generación interna de armónicas puede ser normalmente pequeña o despreciable.

En la Figura 2.1 se puede observar el diagrama de conexión del equipo **CUFP**, así como las variables de entrada y salida. La estructura del **CUFP** incluye un capacitor que

funciona para almacenar energía de CD y que encadena a los dos inversores, el inversor en derivación y el inversor en configuración serie. Forman parte del esquema dos transformadores, un transformador en paralelo el cual se encarga de proporcionar potencia al dispositivo CUFP y un transformador serie el cual "inyecta" el voltaje sobre la línea de transmisión.

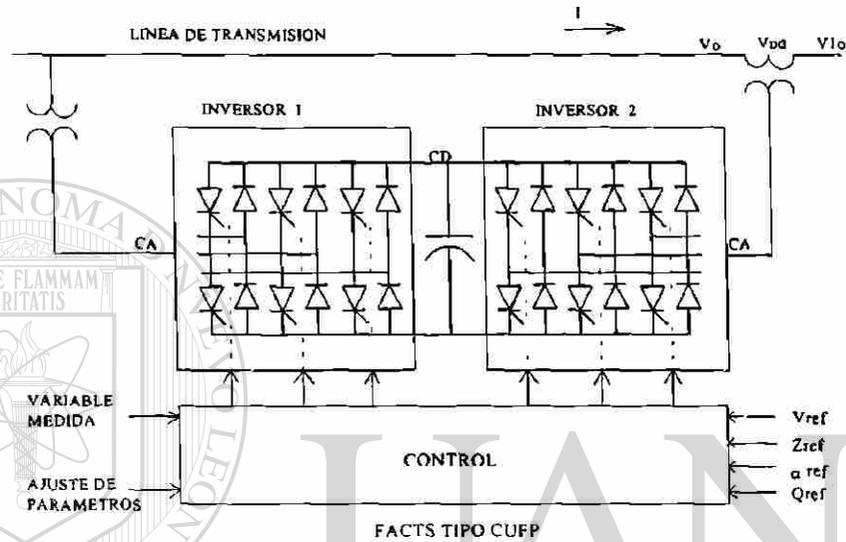


Fig. 2.1 Diagrama de conexión del CUFP (Controlador Unificado de Flujo de Potencia).

En la Figura 2.2 se puede observar diagramas fasoriales, en los cuales se aprecia el funcionamiento del CUFP. En la Figura 2.2.a se observa la salida del CUFP que es el producto de los efectos de regulación de voltaje terminal, una modificación de la impedancia de línea y una regulación del ángulo de fase, como se muestra en el diagrama fasorial, donde:

$$V_{pq} = \Delta V_O + V_C + V_\alpha \quad (2.1)$$

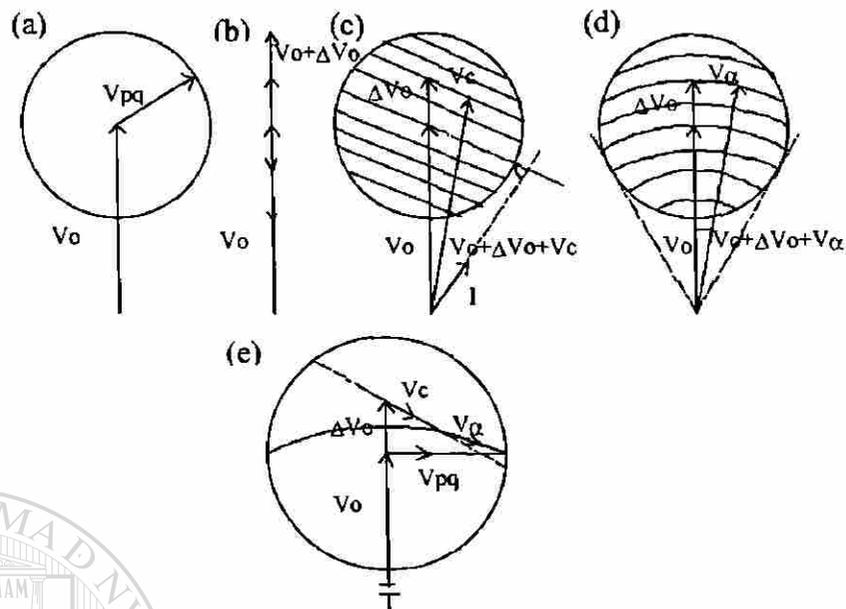


Fig. 2.2 Diagrama fasorial general. (a) Aportación de voltaje serie en función del flujo de potencia; (b) Regulación de voltaje terminal, (c) Voltaje terminal y regulación de impedancia de línea, (d) Voltaje terminal y regulación de ángulo de fase, e) Regulación simultánea de voltaje terminal, de impedancia de línea y de ángulo de fase por un manejo apropiado del voltaje serie.

## 2.5 CONCLUSIONES

En este capítulo se ha presentado el término **FACTS** y los diversos equipos tipo **FACTS** ya sea conectados en serie, en paralelo y los tipos mixtos. Cada uno de los equipos descritos tiene una función de control definida, unos se diseñan con la función de controlar el voltaje nodal, otros para controlar el ángulo de defasamiento entre nodos y otros para controlar la impedancia del elemento de transmisión.

Al analizar la respuesta de los equipos descritos se concluye que de acuerdo a la acción de control requerida, así es la selección del equipo para cumplir con los requerimientos, por ejemplo para el estado estable:

- Si se requiere controlar el voltaje en un nodo de carga, se selecciona un Compensador Estático de VARs (CEV). Así se maneja la potencia reactiva en el nodo

- Si se desea aumentar la transferencia de potencia por una línea se selecciona un Compensador Serie Controlado por Tiristores (CSCT), el cual controla el cambio de reactancia de la línea.
- Si se requiere modificar las diferencias angulares entre dos nodos se puede utilizar un equipo defasador.

Como puede observarse, en general, los equipos mencionados sólo controlan un parámetro. En cambio el CUFP controla tres variables de transmisión, lo cual le da flexibilidad para su uso en el sistema eléctrico, y permite controlar de manera flexible y suave el flujo de potencia por la línea en donde se localiza. Por la razón expuesta se detalla su descripción y se justifica su utilización en líneas que unen eléctricamente áreas eléctricas del sistema y que requieren un control flexible y versátil. La aplicación del CUFP puede proporcionar un apoyo a sistemas que requieran controlar el flujo de potencia por los enlaces entre áreas vecinas y a la vez reforzar la estabilidad del sistema, o bien para tener efectos benéficos sobre el control de oscilaciones de baja frecuencia y su amortiguamiento.

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## CAPITULO 3

# MODELADO DEL CUIFP, CONTROL UNIFICADO DE FLUJO DE POTENCIA

### 3.1 INTRODUCCION

La creciente necesidad de incorporar al sistema de potencia equipos que controlen los flujos y el voltaje de operación, así como el que se cumpla el objetivo principal de tener una operación más confiable y con seguridad en el suministro de energía justifica técnicamente y de manera amplia la incorporación de dispositivos de control versátiles como el CUIFP. Este equipo es un dispositivo que controla el flujo de potencia por una línea, realizando una redistribución en el sistema dentro de los límites del equipo. En caso de violar los límites operativos, el valor de la variable de control se fija en un valor constante, dejando libre la variable a controlar. En las condiciones descritas, al violarse algún límite operativo el dispositivo se comporta como un elemento pasivo solamente, o como un compensador de valor fijo.

---

Con la creciente aplicación de elementos de electrónica de potencia se están desarrollando equipos con mejor respuesta para el control de los sistemas de potencia, los **FACTS** se desarrollan con dos objetivos principales en mente que son [4]:

- ◆ El incrementar la capacidad de transferencia de las líneas de transmisión.
- ◆ El proporcionar control directo del flujo de potencia por trayectorias de transmisión deseadas.

El **CUIFP** cumple con objetivos de control como los mencionados, dándole gran flexibilidad al sistema para enviar el flujo de potencia por una línea deseada, dadas las características del control del equipo.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DEL CUFPP (CONTROL UNIFICADO DE FLUJO DE POTENCIA).

De los equipos (FACTS) que existen, el que tiene las mejores características de control de las variables que determinan el flujo de potencia por la línea es el CUFPP, el cual se estudia con mayor grado de detalle en este trabajo. Este equipo tiene características tales que permite establecer dos modelos diferentes, los cuales permiten incluir grados de detalle diferentes.

Las características mencionadas del CUFPP, se deben representar mediante un modelo matemático que relacione la física del equipo en las ecuaciones usadas, para que al efectuar el proceso de solución, el resultado refleje lo más fielmente posible la respuesta del equipo, al estar éste incorporado en un sistema eléctrico de potencia. Por esta razón las variables que controla el CUFPP están relacionadas con las ecuaciones que se utilizan para resolver el problema de flujos de potencia, las cuales pueden resolverse por el método de Newton-Raphson, en su versión polar.

El equipo se puede representar mediante dos fuentes síncronas que inyectan/toman potencia al sistema, una fuente en serie representada por  $V_s \angle \theta_s$  que “inyecta” en la línea un voltaje con magnitud y ángulo para que se establezca un flujo de potencia especificado, el cual es indicado como  $P_{km} + jQ_{km}$ , y una fuente en paralelo representada por  $V_v \angle \theta_v$  que toma potencia real de la línea para inyectarla por medio de la fuente conectada en serie. La fuente en paralelo tiene la característica de trabajar de dos maneras diferentes: una con factor de potencia diferente al unitario, modo en el cual funciona también como compensador en el nodo de salida, y otra con factor de potencia unitario. El segundo caso permite reducir el número de ecuaciones, ya que se omiten las que corresponden a la fuente en derivación, y se considera al equipo formado solamente por la fuente en serie con la línea de transmisión.

En la sección siguiente se presenta la Figura 3.1, que muestra un circuito equivalente que representa matemáticamente la física del equipo, se considera un factor de potencia

diferente al unitario, el cual es el llamado modelo completo. En la Figura 3.2, se presenta el circuito equivalente del equipo suponiendo que opera con un factor de potencia unitario, el cual es el llamado modelo simplificado.

### 3.3 MODELO COMPLETO DEL CUFPP

El modelo completo del CUFPP utiliza todos los datos del equipo en el desarrollo de sus ecuaciones. Utiliza en su circuito equivalente dos fuentes, se considera la impedancia de los dos transformadores y todos los datos iniciales [3], como son: voltajes iniciales de las dos fuentes del equipo, y el flujo de potencia especificado que se desea que fluya por la línea.

#### 3.3.1 Deducción de Ecuaciones

Para determinar las ecuaciones de comportamiento eléctrico del CUFPP, se toma como base el circuito equivalente de la Figura 3.1, la cual muestra las variables nodales y los parámetros del equipo y de la línea de transmisión.

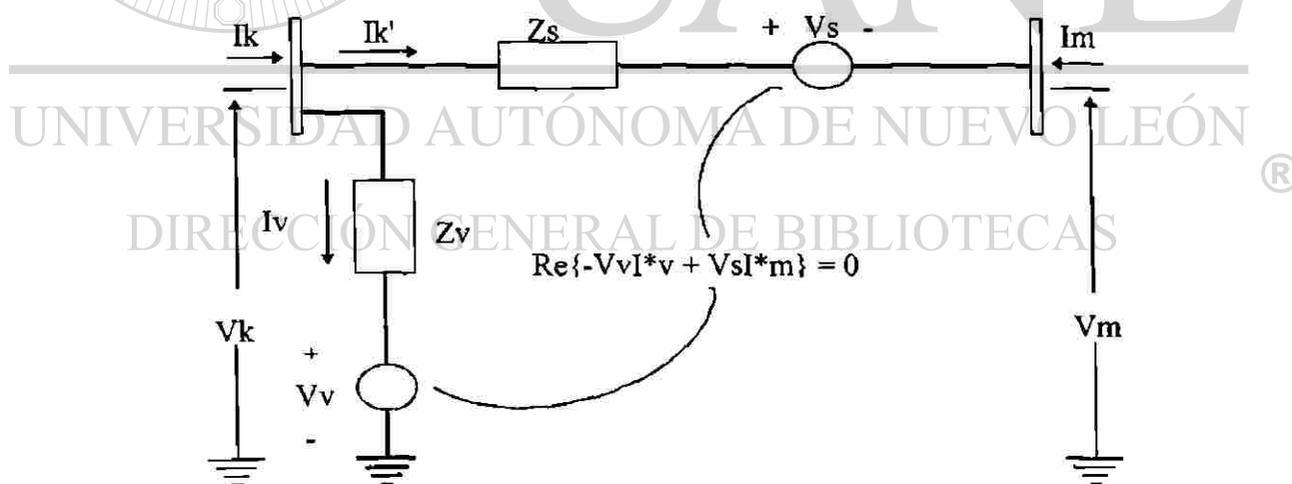


Fig. 3.1. Circuito Equivalente del CUFPP.

Las ecuaciones de potencia nodal en este modelo se escriben como:

Nodo de envío k:

$$\begin{aligned}
 P_k = & V_k^2 G_{kk} + V_k V_m [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)] \\
 & + V_k V_s [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_s) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_s)] \\
 & + V_k V_v [G_v \cos(\theta_k - \theta_v) + B_v \sin(\theta_k - \theta_v)]
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned}
 Q_k = & -V_k^2 B_{kk} + V_k V_m [G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)] \\
 & + V_k V_s [G_{km} \sin(\theta_k - \theta_s) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_s)] \\
 & + V_k V_v [G_v \sin(\theta_k - \theta_v) - B_v \cos(\theta_k - \theta_v)]
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Para el nodo de recepción m:

$$\begin{aligned}
 P_m = & V_m^2 G_{mm} + V_m V_k [G_{mk} \cos(\theta_m - \theta_k) + B_{mk} \sin(\theta_m - \theta_k)] \\
 & + V_m V_s [G_{mm} \cos(\theta_m - \theta_s) + B_{mm} \sin(\theta_m - \theta_s)]
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

$$\begin{aligned}
 Q_m = & -V_m^2 B_{mm} + V_m V_k [G_{mk} \sin(\theta_m - \theta_k) - B_{mk} \cos(\theta_m - \theta_k)] \\
 & + V_m V_s [G_{mm} \sin(\theta_m - \theta_s) - B_{mm} \cos(\theta_m - \theta_s)]
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

La potencia que maneja el convertidor serie:

$$\begin{aligned}
 P_s = & V_s^2 G_{mm} + V_s V_k [G_{km} \cos(\theta_s - \theta_k) + B_{km} \sin(\theta_s - \theta_k)] \\
 & + V_s V_m [G_{mm} \cos(\theta_s - \theta_m) + B_{mm} \sin(\theta_s - \theta_m)]
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned}
 Q_s = & -V_s^2 B_{mm} + V_s V_k [G_{km} \sin(\theta_s - \theta_k) - B_{km} \cos(\theta_s - \theta_k)] \\
 & + V_s V_m [G_{mm} \sin(\theta_s - \theta_m) - B_{mm} \cos(\theta_s - \theta_m)]
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

En cambio, para el convertidor paralelo:

$$P_v = -V_v^2 G_{vR} + V_v V_k [G_v \cos(\theta_v - \theta_k) + B_v \sin(\theta_v - \theta_k)] \quad (3.7)$$

$$Q_v = V_v^2 B_{vR} + V_v V_k [G_v \sin(\theta_v - \theta_k) - B_v \cos(\theta_v - \theta_k)] \quad (3.8)$$

La matriz de admitancias nodal del sistema,  $Y_{NODAL}$ , se ve afectada en los valores colocados en los renglones y columnas del nodo donde está colocado el elemento de control y se modifica de la siguiente manera: a los valores de  $Y_{NODAL}$  se le agregan los valores del dispositivo[3], los cuales se muestran en las ecuaciones (3.9), (3.10) y (3.11).

$$Y_{kk} = G_{kk} + jB_{kk} = Z_s^{-1} + Z_v^{-1} \quad (3.9)$$

$$Y_{mm} = G_{mm} + jB_{mm} = Z_s^{-1} \quad (3.10)$$

$$Y_{km} = Y_{mk} = G_{km} + jB_{km} = -Z_s^{-1} \quad (3.11)$$

$$Y_v = G_v + jB_v = -Z_v^{-1} \quad (3.12)$$

Si en una aproximación razonable se supone que la operación de los convertidores del CUPP es sin pérdidas, el voltaje del enlace común de CD se mantiene constante. La potencia real asociada con el convertidor serie viene de la potencia de CD  $V_{cd}I_1$ . El convertidor en derivación proporciona la potencia necesaria para mantener el voltaje  $V_{cd}$  constante. Entonces la potencia real  $P_{vR}$ , proporcionada por el convertidor en derivación debe satisfacer el valor de la potencia real que es demandada por el convertidor serie  $P_{cR}$ .

$$P_{vR} + P_{cR} = 0 \quad (3.13)$$

Por lo tanto:

$$\Delta P_{bb} = P_{vR} + P_{cR} \quad (3.14)$$

En (3.13) se muestra que la potencia demandada por el convertidor serie es proporcionada por el convertidor en paralelo, y se mantiene el balance de la potencia activa. En (3.14) se calcula el desajuste de potencia en el equipo, y la potencia reactiva se deja libre para que su valor se ajuste y aporte la potencia reactiva necesaria a fin de mantener el voltaje en terminales con valores sensiblemente iguales a los valores iniciales.

Para complementar el conjunto de ecuaciones ya presentado es necesario establecer las ecuaciones de transferencia de potencia real y de potencia reactiva sobre la línea de transmisión, incluyendo el efecto del equipo CUF, el cual se considera ya instalado.

$$P_{km} = V_k^2 G_{km} + V_k V_m [-G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)] \quad (3.15)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 B_{km} + V_k V_m [-G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)] \quad (3.16)$$

Al tomar las derivadas parciales para cada una de las expresiones, (3.1) a (3.16), se obtienen los elementos de la matriz Jacobiana, la cual forma parte del conjunto de ecuaciones expresadas en forma incremental. A continuación se muestra el tipo de matriz Jacobiana que resulta cuando entre los nodos  $k$  y  $m$  se supone que se tiene conectado un elemento tipo CUF.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{km} \\ \Delta Q_{km} \\ \Delta P_{bb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_v} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_s} & \frac{\partial P_k}{\partial V_s} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_v} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_v} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_s} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_s} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_v} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & 0 & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_s} & \frac{\partial P_m}{\partial V_s} & 0 \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & 0 & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_s} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_s} & 0 \\ \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} & 0 & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_s} & \frac{\partial P_{km}}{\partial V_s} & 0 \\ \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_k} & 0 & \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_s} & \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_s} & 0 \\ \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_v} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_m} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_s} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_s} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \theta_v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_m \\ \Delta \theta_s \\ \Delta V_s \\ \Delta \theta_v \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Como en el nodo de envío se considera que existe una fuente de voltaje conectada en paralelo, un procedimiento es calcular el ángulo y el voltaje se fija en el valor inicial. Con este modelo los elementos de la matriz Jacobiana se modifican alterándose tres filas y tres columnas, tal como se mostró en (3.17).

### 3.4 MODELO SIMPLIFICADO DEL CUPF

El modelo simplificado del CUPF se obtiene bajo las siguientes condiciones y consideraciones:

- No se considera la impedancia de los transformadores serie y paralelo.
- Se considera que el convertidor en derivación opera con factor de potencia unitario.
- El CUPF es representado como una fuente de voltaje ideal en serie, funcionando como una fuente de voltaje síncrona, la cual “inyecta” en serie una magnitud de voltaje y ángulo los cuales toman valores que son variables. Este valor complejo se ajusta automáticamente, con lo cual también se controla el intercambio de potencia activa y de potencia reactiva entre el CUPF y el sistema de potencia.

### 3.4.1 Deducción de Ecuaciones

La representación esquemática del modelo simplificado para el CUFP se presenta en la Figura 3.2.

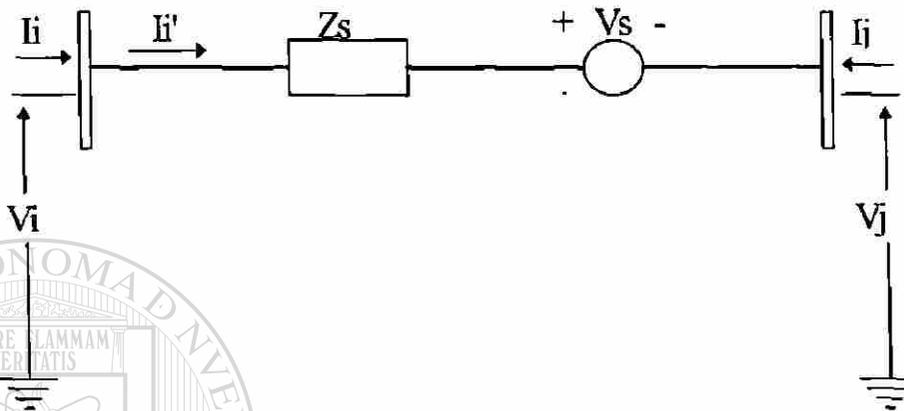


Fig. 3-2 Representación de CUFP modelo simplificado.

Con la representación para la línea de transmisión mostrada en la Figura 3.2 se observa que este modelo se tiene una fuente en serie con la línea de transmisión, determinándose las siguientes ecuaciones:

Para nodo de envío i:

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + V_i V_j [G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \operatorname{sen} \theta_{ij}] - V_i V_s [G_{ii} \cos(\theta_i - \theta_s) + B_{ii} \operatorname{sen}(\theta_i - \theta_s)] \quad (3.18)$$

$$Q_i = V_i^2 B_{ii} + V_i V_j [G_{ij} \operatorname{sen} \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}] - V_i V_s [G_{ii} \operatorname{sen}(\theta_i - \theta_s) - B_{ii} \cos(\theta_i - \theta_s)] \quad (3.19)$$

para el nodo de recepción  $j$ ,

$$P_j = V_j^2 G_{jj} + V_j V_i [G_{ji} \cos \theta_{ji} + B_{ji} \sin \theta_{ji}] - V_j V_S [G_{ji} \cos(\theta_j - \theta_S) + B_{ji} \sin(\theta_j - \theta_S)] \quad (3.20)$$

$$Q_j = V_j^2 G_{jj} + V_j V_i [G_{ji} \sin \theta_{ji} - B_{ji} \cos \theta_{ji}] - V_j V_S [G_{ji} \sin(\theta_j - \theta_S) - B_{ji} \cos(\theta_j - \theta_S)] \quad (3.21)$$

Al escribir las derivadas parciales para las ecuaciones (3.18) a (3.21), se obtienen elementos de la matriz Jacobiana de un sistema de ecuaciones en su forma incremental. La ecuación (3.26) muestra la matriz Jacobiana entre los nodos  $i, j$ ; nodos entre los que se supone conectado un dispositivo **CUFP**.

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P_i}{\Delta P_j} \\ \frac{\Delta Q_i}{\Delta Q_j} \\ \frac{\Delta P_{ij}}{\Delta Q_{ij}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_j} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_i}{\partial V_S} \\ \frac{\partial P_j}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_j}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_j}{\partial V_i} & \frac{\partial P_j}{\partial V_j} & \frac{\partial P_j}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_j}{\partial V_S} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_S} \\ \frac{\partial Q_j}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_j}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_j}{\partial V_i} & \frac{\partial Q_j}{\partial V_j} & \frac{\partial Q_j}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_j}{\partial V_S} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_S} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_S} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_S} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Delta \theta_i}{\Delta \theta_j} \\ \frac{\Delta V_i}{\Delta V_j} \\ \frac{\Delta \theta_S}{\Delta V_S} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

### 3.5 CONDICIONES INICIALES

El método iterativo de Newton-Raphson para resolver un sistema de ecuaciones no lineales requiere del conocimiento de un punto de arranque o valores iniciales, los cuales

para el problema a resolver se determinan de la siguiente manera:

Las condiciones iniciales de la fuente serie:

Ángulo inicial de la fuente serie:

$$\theta_s^\circ = \arctan\left(\frac{P_{mref}}{C1}\right) \quad (3.23)$$

Voltaje inicial de la fuente serie:

$$V_s^\circ = \left(\frac{X_s}{V_m^\circ}\right) \sqrt{P_{mref}^2 + C1^2} \quad (3.24)$$

donde:

$$C1 = Q_{mref} - \frac{V_k^\circ}{X_s} (V_m^\circ - V_k^\circ) \quad \text{si } V_m^\circ \neq V_k^\circ \quad (3.25)$$

$$C1 = Q_{mref} \quad \text{si } V_m^\circ = V_k^\circ$$

Los valores iniciales requeridos en el proceso iterativo para la fuente en derivación:

$$\theta_v^\circ = -\arcsen\left(\frac{(V_m^\circ - V_k^\circ) V_s^\circ X_v \sen(\theta_s^\circ)}{V_v^\circ V_k^\circ X_s}\right) \quad (3.26)$$

donde:

- $X_s$  Reactancia inductiva de la fuente serie
- $X_v$  Reactancia inductiva de la fuente en derivación
- $^\circ$  Superíndice que indica valor inicial
- $V_v^\circ$  Voltaje inicial del convertidor en derivación. Se le asigna el mismo valor que el de la barra en que está conectado y se ajusta durante el proceso iterativo.

Si algún límite operativo del **CUFP** se viola, entonces la magnitud de voltaje del equipo se fija en el límite y la variable a controlar se deja libre.

### 3.6 CONSIDERACIONES Y OBSERVACIONES RESPECTO A MODELOS DEL CUFP

La deducción de las ecuaciones del modelo completo y de las ecuaciones del modelo simplificado se hace partiendo de las Figuras 3.1 y 3.2 respectivamente. Las ecuaciones son diferentes ya que en el modelo completo se compensa en los nodos extremos de la línea donde está conectado el **CUFP**, este hecho ayuda a que los nodos vecinos mantengan un voltaje más estable. El modelo simplificado, en cambio, hace que el valor del flujo por la línea tome el valor especificado y no efectúa ninguna compensación en el nodo de salida de la línea donde está conectado el equipo. Esta es la razón por la cual las ecuaciones de potencia nodal son expresiones diferentes en ambos modelos.

La ecuación para determinar la transferencia de potencia por la línea es igual en los dos modelos. Para los valores de reactancia del **CUFP** en el modelo completo se toman las de las dos fuente a fin de modificar la matriz de admitancias nodales del sistema bajo estudio, en cambio en el modelo simplificado no se considera que la reactancia modifica a la matriz de admitancias y sólo se utiliza para calcular las condiciones iniciales y los efectos de **CUFP** en los nodos.

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La matriz Jacobiana de ambos modelos del **CUFP**, en el modelo linealizado del proceso iterativo, son diferentes en tamaño y en estructura. Al incluir el modelo completo del **CUFP** se altera la matriz Jacobiana básica del sistema que es la que existe cuando no hay equipos de control conectados, y se modifica en tres renglones y en tres columnas por cada equipo que se instala en el sistema. En cambio, para incluir el modelo simplificado sólo se altera la matriz Jacobiana en dos renglones y en dos columnas por cada **CUFP** instalado.

## CAPITULO 4

### ANALISIS DE SENSITIVIDAD Y LOCALIZACION EFECTIVA DE CONTROLES EN REDES ELECTRICAS

#### 4.1. INTRODUCCION

En un sistema eléctrico de potencia es importante conocer el efecto que provocan los cambios en las variables de control sobre las variables dependientes. Normalmente los controles están relacionados con cambios de derivaciones en transformadores, con aumentar o disminuir la excitación en generadores con capacidad de regulación, o bien cuando se dispone de capacidad para aportar o reducir la inyección de potencia generada por unidades conectadas al sistema. Pero otra modalidad se tiene al requerir colocar controles nuevos, y las preguntas a responder son: ¿En qué lugar deben colocarse los controles para que su acción sea efectiva?, ¿Cuál es el grado de influencia que tiene dicho control sobre las variables eléctricas de nodos vecinos?. Al responder a estas cuestiones se puede controlar el sistema, de una mejor manera, utilizando los equipos disponibles y dándoles una aplicación más provechosa.

---

De manera particular es importante evaluar la localización y los efectos del CUF<sup>®</sup> en el sistema, lo cual puede llevarse a cabo usando un modelo linealizado el cual permite calcular factores de sensibilidad. Los factores de sensibilidad relacionan cuantitativamente al cambio en el control con los efectos sobre las variables dependientes. Una formulación como la que se comenta facilita la toma de decisiones en el ambiente de planeación o bien en la operación del sistema de potencia, ya que permite evaluar la efectividad del cambio para determinar la mejor acción que tiene el mayor efecto sobre el flujo de potencia en la línea. De esta manera es posible seleccionar el lugar más adecuado en el sistema para instalar el equipo de control y que proporcione el mejor servicio.

El análisis de sensibilidad en problemas no lineales, como es el caso de los sistemas eléctricos de potencia, extrapola el comportamiento del sistema alrededor de un punto de operación, siempre y cuando los cambios sean pequeños. En la mayoría de los casos los coeficientes de sensibilidad se deben calcular para diferentes niveles de demanda [25], ya que la configuración de la red y las condiciones operativas influyen en los valores de dichos coeficientes.

Entre las alternativas disponibles para la obtención de coeficientes de sensibilidad está el cálculo analítico mediante expresiones diferenciales, siendo éste un posible método a usar para calcular los coeficientes en este trabajo. Sin embargo, como primera aproximación al problema, en este capítulo se propone una forma linealizada para el cálculo de los coeficientes de sensibilidad, además de aplicar consideraciones válidas en redes de alta tensión; como son las aplicables en la formulación de flujos desacoplados rápidos [29, 30]. Otro enfoque es la determinación numérica de factores de sensibilidad, mediante estudios de flujos, utilizando la solución de desplazamiento de variables al efectuar pequeños cambios en solamente una variable de control a la vez. En ambos procedimientos lo importante es obtener la reacción de sistema al efectuar un cambio en un control.

Para resolver el problema de control del flujo de potencia en el sistema, y visualizar la importancia de los coeficientes de sensibilidad, se tienen dos aspectos:

- ◆ El determinar una medida cuantitativa del efecto de cambios en el sistema.
- ◆ El establecer la dependencia de los coeficientes de sensibilidad respecto de los parámetros del sistema.

## 4.2 ELEMENTO GENERALIZADO DE TRANSMISION

Un elemento de transmisión de CA que permite analizar una línea de transmisión o bien un equipo como un transformador con cambios en derivación y defasamiento a la vez, se

considera un derivador o tap complejo fuera del nominal o también un dispositivo tipo FACTS, que efectúe una acción de control sobre la línea, como se muestra en la Figura 4.1.

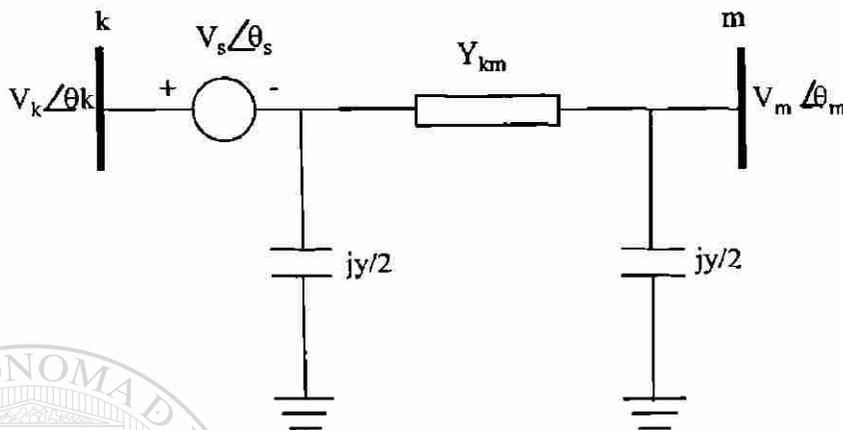


Fig. 4.1 Elemento generalizado de transmisión.

Las ecuaciones para flujo de potencia activa y reactiva del elemento generalizado se escriben como:

$$P_{km} = V_k^2 G_{km} + V_k V_s [-G_{km} \cos(\theta_k - \theta_s) - B_{km} \sin(\theta_k - \theta_s)] + V_k V_m [-G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)] \quad (4.1)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 B_{km} + V_k V_s [-G_{km} \sin(\theta_k - \theta_s) + B_{km} \cos(\theta_k - \theta_s)] + V_k V_m [-G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)] \quad (4.2)$$

Una serie de simplificaciones razonables para líneas de alta tensión [29, 30], tal como se aplica en la formulación del método desacoplado rápido, permite una aproximación para el flujo de potencia real y el flujo de potencia reactiva.

#### 4.2.1 Forma Incremental y Modelo Linealizado para Potencia Real

El flujo de potencia  $P_{km}$ , está en función de las magnitudes de voltajes y de los ángulos nodales de los nodos extremos, también en función de la magnitud del voltaje y del ángulo de defasamiento que proporciona el equipo FACTS, así como de la reactancia del elemento de transmisión en la cual se conecta el equipo de control. Si se considera para el flujo de potencia real una dependencia angular solamente, que se tiene voltajes unitarios y ángulos pequeños, la forma incremental se presenta en (4.3).

$$\Delta P_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} \Delta \theta_m + \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_s} \Delta \theta_s \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} = \frac{1}{X_{km}} \quad \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} = -\frac{1}{X_{km}} \quad \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_s} = -\frac{1}{X_{km}}$$

que al substituir resulta en el modelo incremental (4.4), en un elemento o en una línea:

$$-X_{km} \Delta P_{km} + \Delta \theta_k - \Delta \theta_m = \Delta \theta_s \quad (4.4)$$

La ecuación (4.4) se puede analizar por medio de un circuito análogo equivalente para la potencia real [31], como se muestra en la Figura 4.2.

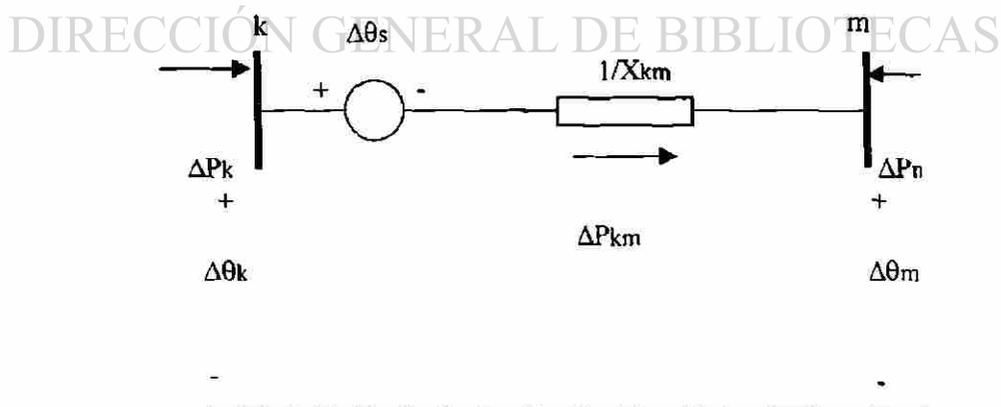


Fig. 4.2 Elemento linealizado de transmisión de potencia real.

#### 4.2.2 Forma Incremental y Modelo Linealizado para Potencia Reactiva

Si para la potencia reactiva se considera que la dependencia directa es respecto del voltaje, y que respecto de la diferencia angular es muy pequeña y con voltajes cercanos al valor unitario, la forma incremental para la potencia reactiva que viaja por el elemento de transmisión, incluyendo las consideraciones del apartado anterior, se tiene (4.5).

$$\Delta Q_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_k} \Delta V_k + \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_m} \Delta V_m + \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_s} \Delta V_s \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial Q_{km}}{\partial V_k} = -\frac{1}{X_{km}} \quad \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_m} = \frac{1}{X_{km}} \quad \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_s} = -\frac{1}{X_{km}}$$

que al substituir resulta en el modelo incremental para un elemento o una línea.

$$-X_{km} \Delta Q_{km} + \Delta V_k - \Delta V_m = \Delta V_s \quad (4.6)$$

La ecuación (4.6) representa un circuito análogo equivalente para la potencia reactiva incremental [31], como se muestra en la Figura 4.3.

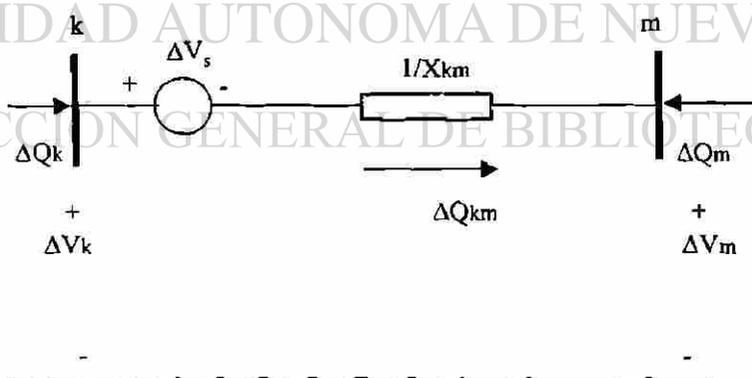


Fig. 4.3 Elemento linealizado de transmisión, flujo de potencia reactiva.

### 4.3 MATRIZ DE SENSITIVIDAD DEL SISTEMA DE 14 NODOS DEL IEEE

Para la red de 14 nodos del IEEE, se evalúa el efecto del control tipo FACTS sobre cada uno de los elementos del sistema, así como sobre los voltajes y ángulos nodales. Para lograr el estudio se establece ecuaciones para cada uno de los elementos de transmisión, así como una ecuación de balance nodal para cada nodo, excepto para el compensador en el caso de analizar el problema de la potencia real. En el caso de tratar el problema de la potencia reactiva, se establecen ecuaciones en cada uno de los elementos de transmisión, así como un balance nodal para cada nodo, excepto en los nodos generador y en el compensador.

#### 4.3.1 Obtención de Matriz de Sensitividad para Potencia Real

En este proceso se consideran todos los ángulos nodales del sistema a excepción del compensador por ser la referencia del sistema. El sistema se muestra en la Figura 4.4 en su forma incremental.

Para el análisis del control y los factores de sensibilidad de la potencia real de (4.7),  $X_p$  es una matriz diagonal de reactancias primitivas y  $A_p$  es una matriz de conectividad, con elementos +1 (nodo de salida de la línea), -1 (nodo de llegada de la línea), y  $O_p$  es una matriz cero. Las ecuaciones de rama y nodo se escriben en forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} X_p & A_p \\ A_p^t & O_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{km} \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_{S_{km}} \\ \Delta P \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

La inversa de la matriz de coeficientes de (4.7), proporciona información de sensibilidad, es decir, del efecto del control en línea y de las inyecciones nodales, [29] sobre los flujos en líneas del sistema y sobre los ángulos nodales.

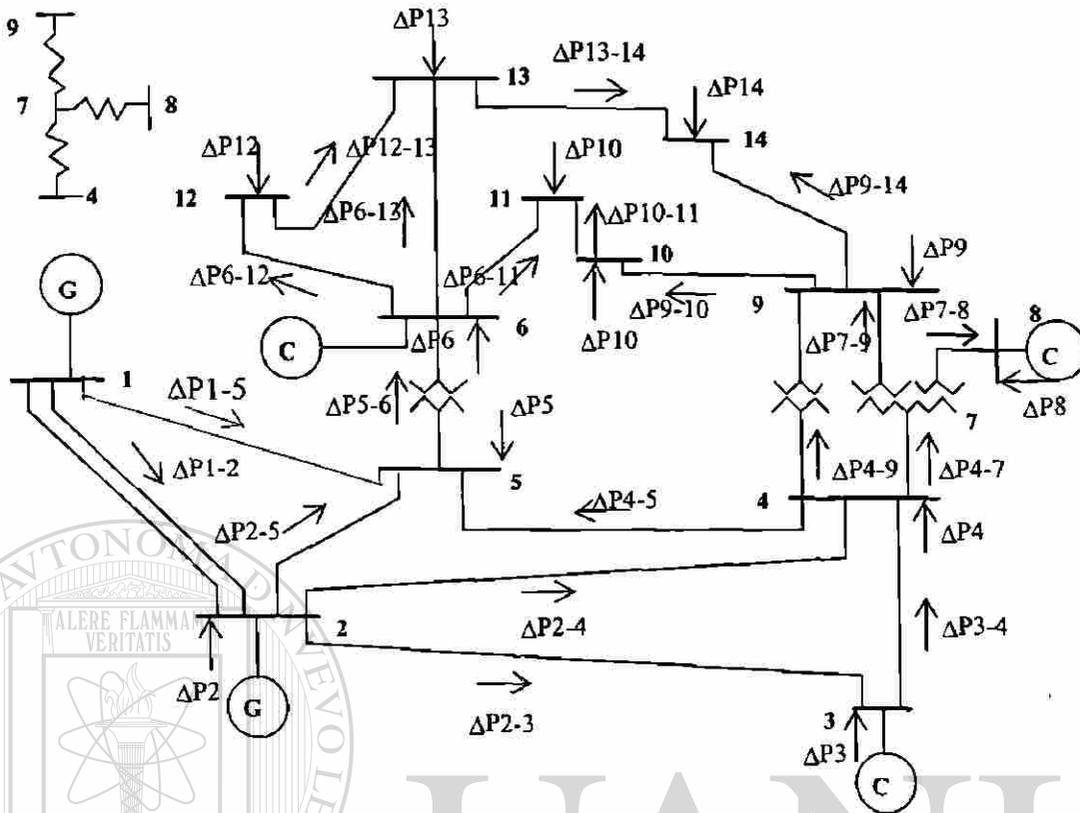


Fig. 4.4 Sistema de prueba IEEE de 14 nodos, forma incremental para potencia real.

$$\begin{bmatrix} \Delta p_{km} \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_p & T_p \\ T_p^t & Z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_{S_{km}} \\ \Delta P \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

El modelo descrito por (4.8) permite estudiar el efecto de controles  $\Delta P$ , que se pueden interpretar como inyecciones de potencia real sobre los nodos del sistema, sobre la potencia real que fluye por los elementos de la red. La información permite conocer la localización más efectiva para el control representado por el elemento defasador  $\Delta \theta_{S_{km}}$ . Debido a la dimensión de las matrices  $X_p$ ,  $A_p$  y  $O_p$ , para el sistema de 14 nodos del IEEE, se listan por separado.



matriz se toma la reactancia de la línea, sin incluir el efecto capacitivo ya que sólo se considera el modelo de la potencia activa. En la matriz de conectividad  $A_p$ , se indica la salida y la llegada de la línea con números: +1 indica el nodo de salida de la línea, -1 indica el nodo de llegada y 0 indica que la línea no tiene conectividad con el nodo que se analiza. La matriz  $O_p$  se usa para completar la matriz, es decir, para obtener una matriz cuadrada y poder obtener la inversa, que es la matriz de sensibilidad del sistema.

$$A_p = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Si en (4.8) se supone activo el control del un dispositivo tipo defasador el cual actúa por medio de un incremento en el ángulo defasador  $\Delta\theta_{skm}$ , en la línea se obtiene el efecto del dispositivo FACTS sobre en la potencia real y sobre los ángulos nodales.

Para ilustrar un caso, sólo se ubica el elemento **FACTS** con efecto defasador, en líneas que no tengan nodos generador o compensador en sus extremos. En la Tabla 4.1 se presentan resultados de sensibilidad para el caso mencionado (todos los valores de la tabla 4.1 están en p.u.).

Tabla 4.1 Sensitividad de flujo de potencia real en líneas respecto del control defasador.

	$\Delta\theta_{s4-5}$	$\Delta\theta_{s7-9}$	$\Delta\theta_{s9-10}$	$\Delta\theta_{s9-14}$	$\Delta\theta_{s10-11}$	$\Delta\theta_{s12-13}$	$\Delta\theta_{s13-14}$
$\Delta P_{1-2}$	-1.3340	-0.0516	-0.0489	-0.0323	-0.0489	0.0072	0.0323
$\Delta P_{1-5}$	1.3340	0.0516	0.0489	0.0323	0.0489	-0.0072	-0.0323
$\Delta P_{2-3}$	-1.1312	-0.0437	-0.0415	-0.0274	-0.0415	0.0061	0.0274
$\Delta P_{2-4}$	-2.3677	-0.0916	-0.0868	-0.0573	-0.0868	0.0127	0.0573
$\Delta P_{2-5}$	2.1648	0.0837	0.0793	0.0524	0.0793	-0.0117	-0.0524
$\Delta P_{3-4}$	-1.1312	-0.0437	-0.0415	-0.0274	-0.0415	0.0061	0.0274
$\Delta P_{4-5}$	-4.5701	0.6807	0.6451	0.4262	0.6451	-0.0948	-0.4262
$\Delta P_{4-7}$	0.6807	-1.6610	-0.4914	-0.3246	-0.4914	0.0722	0.3246
$\Delta P_{4-9}$	0.3905	0.8450	-0.2819	-0.1862	-0.2819	0.0414	0.1862
$\Delta P_{5-6}$	-1.0712	0.8160	0.7733	0.5109	0.7733	-0.1136	-0.5109
$\Delta P_{6-11}$	-0.6451	0.4914	1.3023	-0.5290	1.3023	0.1176	0.5290
$\Delta P_{6-12}$	-0.0948	0.0722	-0.1176	0.2312	-0.1176	-1.7579	-0.2312
$\Delta P_{6-13}$	-0.3314	0.2524	-0.4114	0.8087	-0.4114	1.5267	-0.8087
$\Delta P_{7-8}$	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta P_{7-9}$	0.6807	-1.6610	-0.4914	-0.3246	-0.4914	0.0722	0.3246
$\Delta P_{9-10}$	0.6451	-0.4914	-1.3023	0.5290	-1.3023	-0.1176	-0.5290
$\Delta P_{9-14}$	0.4262	-0.3246	0.5290	-1.0399	0.5290	0.2312	1.0399
$\Delta P_{10-11}$	0.6451	-0.4914	-1.3023	0.5290	-1.3023	-0.1176	-0.5290
$\Delta P_{12-13}$	-0.0948	0.0722	-0.1176	0.2312	-0.1176	-1.7579	-0.2312
$\Delta P_{13-14}$	-0.4262	0.3246	-0.5290	1.0399	-0.5290	-0.2312	-1.0399
$\Delta\theta_2$	0.0790	0.0031	0.0029	0.0019	0.0029	-0.0004	-0.0019
$\Delta\theta_3$	0.3030	0.0117	0.0111	0.0073	0.0111	-0.0016	-0.0073
$\Delta\theta_4$	0.4964	0.0192	0.0182	0.0120	0.0182	-0.0027	-0.0120
$\Delta\theta_5$	-0.2975	-0.0115	-0.0109	-0.0072	-0.0109	0.0016	0.0072
$\Delta\theta_6$	-0.0275	-0.2171	-0.2058	-0.1359	-0.2058	0.0302	0.1359
$\Delta\theta_7$	0.3541	0.3665	0.1209	0.0799	0.1209	-0.0178	-0.0799
$\Delta\theta_8$	0.3541	0.3665	0.1209	0.0799	0.1209	-0.0178	-0.0799
$\Delta\theta_9$	0.2792	-0.4508	0.1750	0.1156	0.1750	-0.0257	-0.1156
$\Delta\theta_{10}$	0.2247	-0.4093	-0.7150	0.0709	0.2850	-0.0158	-0.0709
$\Delta\theta_{11}$	0.1008	-0.3149	-0.4648	-0.0307	-0.4648	0.0068	0.0307
$\Delta\theta_{12}$	-0.0033	-0.2356	-0.1757	-0.1951	-0.1757	0.4799	0.1951
$\Delta\theta_{13}$	0.0156	-0.2500	-0.1522	-0.2413	0.1522	-0.1687	0.2413
$\Delta\theta_{14}$	0.1639	-0.3630	0.0319	-0.6032	0.0319	-0.0882	-0.3968

Por ejemplo, con los valores de los coeficientes de sensibilidad para los flujos de potencia real por las líneas se puede analizar el efecto cuando se lleva a cabo un incremento en el defasador colocado en la línea 5-4. Para lograr lo anterior se analizan los datos de la primera columna de la Tabla 4.1, y de manera particular se tiene:

$$\Delta P_{1-2} / \Delta \theta_{4-5} = -1.334 \quad \Delta P_{2-5} / \Delta \theta_{4-5} = 2.1648 \quad \Delta \theta_4 / \Delta \theta_{4-5} = 0.4964$$

Por lo anterior, si se lleva a cabo un incremento angular usando el defasamiento dado por el control de la línea 4-5, el flujo de potencia real por la línea 1-2 tendrá un cambio de -1.334 veces el valor del incremento del control de defasamiento en la línea. Con el mismo incremento en defasamiento para la línea 4-5 el incremento de la potencia real de la línea 2-5 es de 2.168 veces el incremento del control de defasamiento, etc.

Para los ángulos nodales el incremento del defasamiento por medio del control de la línea 4-5 provoca un cambio en los ángulos nodales. Por ejemplo, en el nodo 4 se tiene un incremento en el ángulo nodal de 0.4964 veces el incremento del control de defasamiento, expresado en radianes.

#### 4.3.2 Obtención de Matriz de Sensitividad para la Potencia Reactiva-Voltaje

En este proceso se incluyen solamente los voltajes de los nodos de carga del sistema, ya que los nodos generadores, se consideran como conectados a la referencia del sistema, debido a que si la unidad de generación tiene reserva de reactivos, el voltaje en terminales permanece constante. El sistema se muestra en la Figura 4.5 en su forma incremental, y se indican los incrementos en los flujos de potencia reactiva por la línea y de la potencia reactiva nodal.

En este proceso sólo se consideran los nodos que no tengan generadores en sus extremos. Para el análisis de potencia reactiva, si  $X_q$  es una matriz diagonal de reactancias primitivas y  $A_q$  es una matriz de conectividad, con elementos +1 (nodo de salida de la línea),

-1 (nodo de llegada de la línea), y 0 (sin conexión). La matriz  $O_q$  es una matriz cero. Las ecuaciones de rama y nodo se escriben en (4.9):

$$\begin{bmatrix} X_q & A_q \\ A_q^t & O_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_{km} \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V_{skm} \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

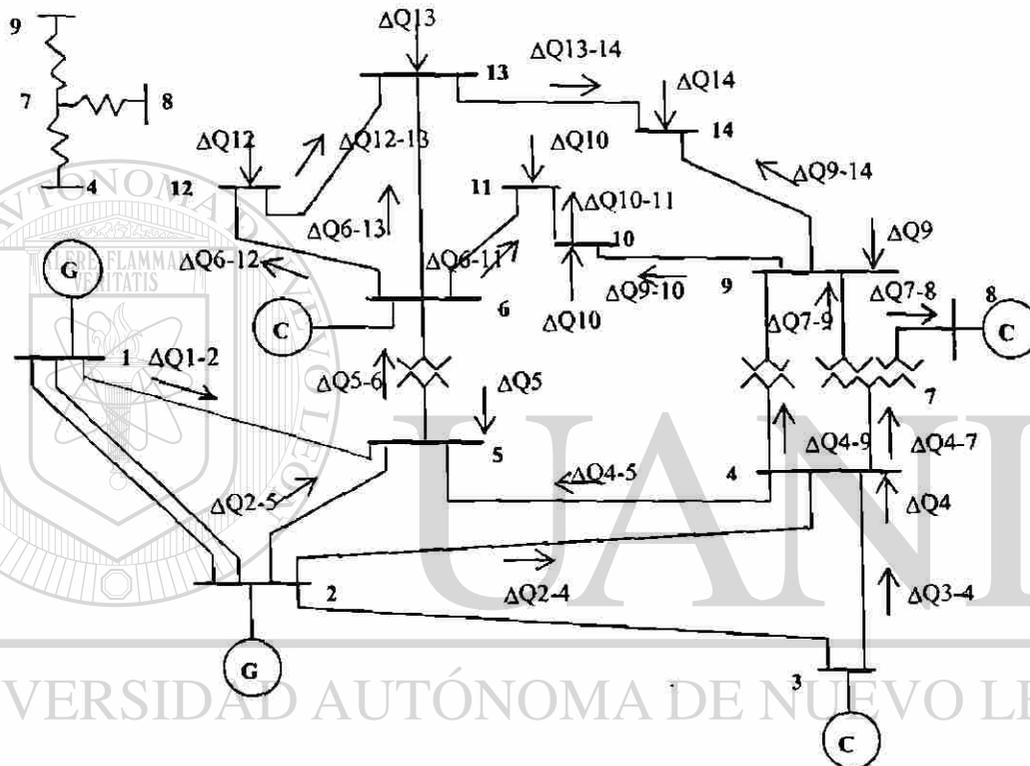


Fig. 4.5 Sistema de prueba IEEE de 14 nodos, forma incremental para potencia reactiva.

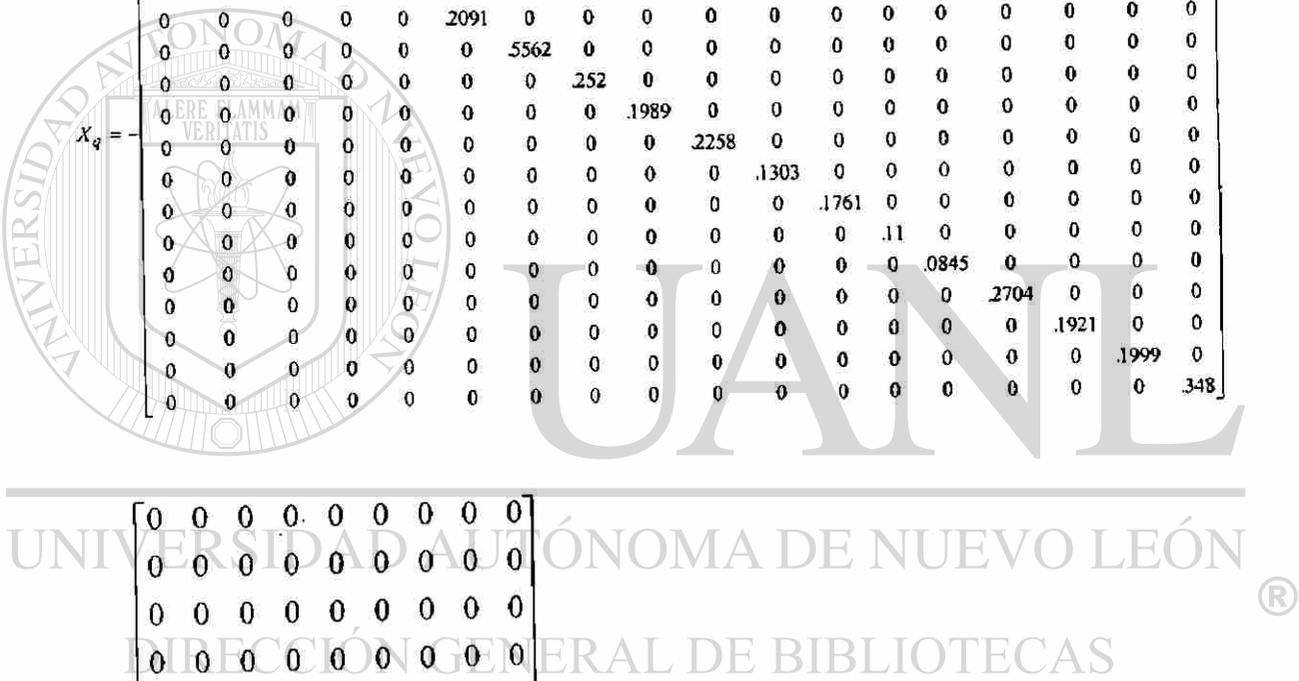
La matriz inversa de (4.9) proporciona información de sensibilidad, es decir los efectos de control y de inyecciones nodales sobre los cambios de flujos de reactivos en las líneas del sistema y sobre los cambios en voltajes nodales, [29]. Si en la ecuación (4.10) se activa el control “inyectando” un  $\Delta V_{skm}$  en la línea se obtiene los efectos del FACTS sobre la potencia reactiva de los nodos y sobre los voltajes nodales, así como los cambios en la potencia reactiva en las líneas del sistema.

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_{km} \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_q & T_q \\ T_q^t & Z_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{Skm} \\ \Delta Q \end{bmatrix} \tag{4.10}$$

Por la dimensión de las matrices  $X_q$ ,  $A_q$  y  $O_q$ , para el sistema de 14 nodos del IEEE, se listan por separado.

$$X_q = \begin{bmatrix} 223 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & .1763 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & .1739 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & .171 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & .0421 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & .2091 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & .5562 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & .252 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & .1989 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & .2258 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & .1303 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & .1761 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & .11 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & .0845 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & .2704 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & .1921 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & .1999 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & .348 \end{bmatrix}$$

$$O_q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



$$A_q = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Si en (4.10) se supone activo el control de un dispositivo con cambio de derivaciones o

'tap', el cual provoca un incremento de valor  $\Delta V_{skm}$ , en el voltaje de la línea, se obtiene el efecto del dispositivo FACTS, principalmente en la potencia reactiva y en los voltajes nodales.

Para ilustrar un caso sólo se ubicará el FACTS con efecto de cambio de derivaciones 'tap' en líneas que no tengan nodos generador o compensador en sus extremos. En la Tabla 4.2 se presentan los resultados de factores de sensibilidad para el caso mencionado (valores en p. u.).

Tabla 4.2 Sensitividad de potencia reactiva de línea respecto del control de voltaje "inyectado" en línea.

	$\Delta V_{S4-5}$	$\Delta V_{S7-9}$	$\Delta V_{S9-10}$	$\Delta V_{S9-14}$	$\Delta V_{S10-11}$	$\Delta V_{S12-13}$	$\Delta V_{S13-14}$
$\Delta Q_{1-5}$	1.7676	-0.1902	-0.0446	0.0359	-0.0446	-0.3691	-0.0359
$\Delta Q_{2-4}$	-1.9592	-0.1949	-0.1611	-0.0549	-0.1611	-0.2725	0.0549
$\Delta Q_{2-5}$	2.2667	-0.2439	-0.0572	0.0461	-0.0572	-0.4734	-0.0461
$\Delta Q_{3-4}$	-2.0199	-0.2009	-0.1661	-0.0566	-0.1661	-0.2810	0.0566
$\Delta Q_{4-5}$	-5.7741	-0.1785	0.4092	0.3922	0.4092	-0.7599	-0.3922
$\Delta Q_{4-7}$	0.8151	-1.0508	-0.3797	-0.2804	-0.3797	0.2258	0.2804
$\Delta Q_{4-9}$	0.9799	0.8335	-0.3568	-0.2232	-0.3568	-0.0194	0.2232
$\Delta Q_{5-6}$	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta Q_{6-11}$	-0.4092	0.9918	1.6469	-0.2983	1.6469	0.0494	0.2983
$\Delta Q_{6-12}$	-0.7599	0.2210	-0.0494	0.2509	-0.0494	-1.6218	-0.2509
$\Delta Q_{6-13}$	0.3677	0.4474	-0.2489	0.9390	-0.2489	1.3709	-0.9390
$\Delta Q_{7-8}$	0.9936	1.4428	0.6121	0.3879	0.6121	0.0048	-0.3879
$\Delta Q_{7-9}$	-0.1785	-2.4937	-0.9918	-0.6684	-0.9918	0.2210	0.6684
$\Delta Q_{9-10}$	0.4092	-0.9918	-1.6469	0.2983	-1.6469	-0.0494	-0.2983
$\Delta Q_{9-14}$	0.3922	-0.6684	0.2983	-1.1899	0.2983	0.2509	1.1899
$\Delta Q_{10-11}$	0.4092	-0.9918	-1.6469	0.2983	-1.6469	-0.0494	-0.2983
$\Delta Q_{12-13}$	-0.7599	0.2210	-0.0494	0.2509	-0.0494	-1.6218	-0.2509
$\Delta Q_{13-14}$	-0.3922	0.6684	-0.2983	1.1899	-0.2983	-0.2509	-1.1899
$\Delta V_4$	0.3454	0.0344	0.0284	0.0097	0.0284	0.0480	-0.0097
$\Delta V_5$	-0.3942	0.0424	0.0099	-0.0080	0.0099	0.0823	0.0080
$\Delta V_7$	0.1750	0.2541	0.1078	0.0683	0.1078	0.0008	-0.0683
$\Delta V_9$	0.1946	-0.4716	0.2169	0.1418	0.2169	-0.0235	-0.1418
$\Delta V_{10}$	0.1600	-0.3878	-0.6439	0.1166	0.3561	-0.0193	-0.1166
$\Delta V_{11}$	0.0814	-0.1973	-0.3276	0.0593	-0.3276	-0.0098	-0.0593
$\Delta V_{12}$	-0.1998	-0.0141	0.0226	-0.0722	0.0226	0.4972	0.0722
$\Delta V_{13}$	-0.0479	-0.0583	0.0324	-0.1223	0.0324	-0.1786	0.1223
$\Delta V_{14}$	0.0886	-0.2909	0.1362	-0.5364	0.1362	-0.0913	-0.4636

En la Tabla 4.2 se presentan valores de factores de sensibilidad que permiten conocer el efecto de una modificación de incremento del voltaje en una línea. El cambio se refleja en un incremento en el flujo de potencia reactiva en la línea y un incremento de voltaje en ciertos nodos del sistema, por ejemplo en forma numérica se tiene:

$$\Delta Q_{1-5} / \Delta V_{4-5} = 1.7676$$

$$\Delta Q_{2-5} / \Delta V_{4-5} = 2.2667$$

$$\Delta V_4 / \Delta V_{4-5} = 0.3454$$

Donde el "incremento" de voltaje serie en la línea 4-5, provocado por la acción de un control que bien puede ser el cambio en la posición de derivaciones, o la acción de un dispositivo **FACTS**, produce un incremento de 1.7676 veces el incremento de voltaje suministrado por el control.

Para el caso de la línea 2-5 se produce un incremento de flujo de potencia reactiva de 2.2667 veces el incremento de voltaje aplicado por el dispositivo de control. Para los voltajes nodales también se presentan incrementos en todo el sistema, por ejemplo, en el nodo 4 el incremento de voltaje que se presenta es de 0.3454 veces el incremento de voltaje "inyectado" en la línea 4-5, los valores se muestra en la Tabla 4.2.

#### 4.4 CONCLUSIONES

Como se estableció con anterioridad el factor de sensibilidad es la razón de dos cantidades incrementales, tales como  $\Delta x/\Delta u$ , las cuales relacionan cambios pequeños de la variable dependiente  $\Delta x$ , con respecto a pequeños cambios de la variable independiente o de control  $\Delta u$ . En los sistemas eléctricos de potencia existen diversos tipos de relaciones de sensibilidad [32], por ejemplo:

- ◆ La sensibilidad entre variables eléctricas; p. ejem., la variación del voltaje nodal  $k$  cuando se tiene un cambio en la inyección de la potencia reactiva en el nodo  $m$ , se representa por  $\Delta V_k/\Delta Q_m$ .
- ◆ La sensibilidad del costo de operación o de inversión con respecto a variables eléctricas. Por ejemplo, el cambio del costo de operación como resultado de un cambio en la generación del nodo  $m$ , se da por  $\Delta C/\Delta P_m$ .

En este capítulo se ha tratado únicamente el análisis del primer tipo de relación de sensibilidad, es decir entre la sensibilidad entre variable eléctricas. El segundo caso no está contemplado en este trabajo, pero es importante en el análisis de costos de producción o en estudio de despacho económico.

Se observa en las Tablas 4.1 y 4.2, que el efecto del incremento de voltaje en magnitud y ángulo "inyectado" en la línea 4-5 tiene un efecto mayor y directo sobre los flujos de la propia línea y que afecta en mayor o menor medida la magnitud y ángulos de los voltajes nodales del sistema, esto dependiendo de la distancia eléctrica. Los resultados de estos modelos lineales permiten localizar de manera preliminar los controles, en lugares eléctricos donde sean más efectivos. Así mismo los resultados permiten visualizar el efecto que los controles tienen sobre todas las variables del sistema de potencia. En el siguiente capítulo se presentan modelos y resultados al colocar equipo tipo **FACTS**, denominado **CUPF**, los cuales permiten controlar el flujo de potencia real o reactiva por una línea, los voltajes nodales en los extremos del **CUPF** en magnitud y ángulo, así como la reactancia del elemento de transmisión de una manera generalizada.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## **CAPITULO 5**

### **MODELOS DE ESTADO ESTABLE DEL CUIFP EN REDES ELECTRICAS DE POTENCIA**

#### **5.1 INTRODUCCION**

Los modelos para el CUIFP presentados en el capítulo anterior; el modelo completo y el simplificado, tienen como finalidad principal poder analizar el control del flujo de potencia activa y el flujo de potencia reactiva y sus efectos en el sistema eléctrico en estado estable. Al plantear el modelo para la red eléctrica que representa el sistema se obtiene un conjunto de ecuaciones no-lineales y para obtener su solución se aplica un proceso iterativo que se basa en el método de Newton-Raphson. Al lograr convergencia del proceso iterativo se puede calcular flujos de potencia en los elementos del sistema, transformadores y líneas, así como las pérdidas de transmisión. Para el proceso iterativo es de interés analizar el comportamiento de convergencia y hacer una comparación de formulaciones y algoritmos usados para lograr los resultados.

---

#### **5.2 SISTEMA ELECTRICO DE PRUEBA**

El sistema de prueba que se usa extensivamente en este trabajo es el sistema de 14 nodos del IEEE. Los datos de este sistema se presentan en la Tabla 5.1 y en la Tabla 5.2. La Figura 5.1 muestra el diagrama unifilar del sistema donde se indican las cargas nodales, así como los valores de voltajes para los nodos de generación. Para iniciar el proceso iterativo y obtener la solución del sistema de ecuaciones no-lineal se toma como voltajes iniciales los valores de 1.0 p.u. en los nodos de carga, y en el caso de los ángulos se les asigna un valor de 0° grados para todos los nodos del sistema. El nodo compensador, para facilitar en el manejo de la información, es el nodo 1. El nodo 2 es de voltaje controlado y los nodos 3, 6 y 8 son nodos en donde se tiene conectados condensadores síncronos. En este trabajo los

condensadores síncronos se modelan como generadores, pero con potencia reactiva ilimitada, es decir se supone que se comportan como nodos de voltaje controlado.

TABLA 5.1 Datos del Sistema de 14 nodos del IEEE.

Nodo de salida	Nodo de llegada	R (p.u.)	X (p.u.)	Y/2 (p.u.)
1	2	0.0194	0.0592	0.0264
1	5	0.0540	0.2230	0.0246
2	3	0.0470	0.1980	0.0219
2	4	0.0531	0.1763	0.0187
2	5	0.0569	0.1739	0.0170
3	4	0.0670	0.1710	0.0173
4	5	0.0133	0.0421	0.0064
6	11	0.0950	0.1989	0.0000
6	12	0.1229	0.2558	0.0000
6	13	0.0661	0.1303	0.0000
7	8	0.0000	0.1761	0.0000
7	9	0.0000	0.1100	0.0000
9	10	0.0318	0.0845	0.0000
9	14	0.1271	0.2704	0.0000
10	11	0.0820	0.1921	0.0000
12	13	0.2209	0.1999	0.0000
13	14	0.1409	0.3480	0.0000

TABLA 5.2 Datos de Transformadores, Sistema de 14 nodos del IEEE.

Nodo de salida	Nodo de llegada	R (p.u.)	X (p.u.)	Posición del Tap (p.u.)
4	7	0.0000	0.2091	0.9780
4	9	0.0000	0.5562	0.9690
5	6	0.0000	0.2520	0.9320

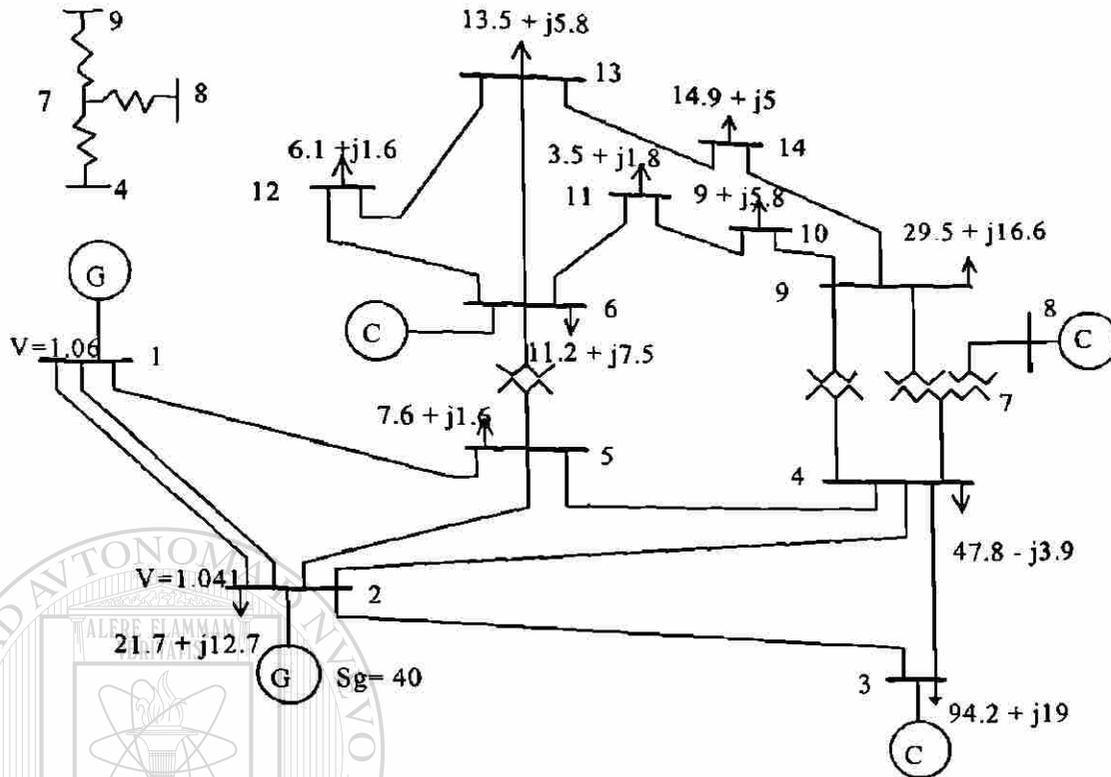


Fig. 5.1 Sistema de prueba de 14 nodos del IEEE.

Los datos en por unidad están en una base de 100 MW.

El sistema de 14 Nodos del IEEE consiste de:

2	Generadores
3	Compensadores síncronos
11	Nodos de carga
20	Líneas
3	Transformadores con cambiador de derivaciones

### 5.3 RESULTADOS DEL SISTEMA SIN INCLUIR EL CUPF

Primero se resuelve el problema de flujos, sin considerar el efecto del dispositivo CUPF en el sistema, esto se hace con el fin de conocer las condiciones de operación del sistema sin el efecto de los dispositivos FACTS.

Se resuelve el sistema de 14 nodos por medio de un programa de flujos de carga convencional en formulación polar, y se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 5.3. Se presenta la magnitud de los voltajes y los valores de los ángulos nodales. En la Tabla 5.4 se muestran los flujos de potencia por las líneas del sistema.

TABLA 5.3 Voltajes y ángulos nodales

Nodo	Voltajes (p.u.)	Ángulos (grados)
1	1.0600	0
2	1.0450	-4.9750
3	1.0000	-12.6087
4	1.0147	-10.2663
5	1.0253	-8.8666
6	1.0000	-15.5153
7	0.9804	-13.7765
8	1.0000	-13.7765
9	0.9634	-15.6778
10	0.9618	-15.9756
11	0.9769	-15.8809
12	0.9824	-16.4696
13	0.9758	-16.4960
14	0.9492	-17.2191

TABLA 5.4 Flujos de potencia en las líneas del sistema de 14 nodos del IEEE.

Nodo de envío	Nodo de recepción	Flujo de envío (p.u.)	Flujo de recepción (p.u.)
1	2	$1.5656 - 0.2037i$	$-1.5228 + 0.2759i$
1	5	$0.7606 + 0.0112i$	$-0.7327 + 0.0504i$
7	9	$0.2849 + 0.1562i$	$-0.2849 - 0.1442i$
7	8	$0.0000 - 0.1090i$	$0.0000 + 0.1112i$
2	3	$0.7276 + 0.0876i$	$-0.7043 - 0.0352i$
2	4	$0.5613 - 0.0001i$	$-0.5446 + 0.0114i$
2	5	$0.4169 - 0.0226i$	$-0.4078 + 0.0138i$
3	4	$-0.2377 - 0.0051i$	$0.2415 - 0.0204i$
4	5	$-0.6205 - 0.0600i$	$0.6255 + 0.0625i$
6	11	$0.0707 + 0.0824i$	$-0.0696 - 0.0800i$
6	12	$0.0790 + 0.0314i$	$-0.0781 - 0.0295i$
13	6	$0.1773 + 0.0969i$	$-0.1746 - 0.0916i$
9	10	$0.0560 - 0.0027i$	$-0.0559 + 0.0030i$
9	14	$0.0945 + 0.0076i$	$-0.0933 - 0.0050i$
10	11	$-0.0341 - 0.0610i$	$0.0346 + 0.0620i$
12	13	$0.0171 + 0.0135i$	$-0.0170 - 0.0134i$
13	14	$0.0567 + 0.0470i$	$-0.0557 - 0.0450i$

TABLA 5.5 Flujos de potencia en transformadores.

Nodo de envío	Nodo de recepción	Flujo de salida (p.u.)	Flujo de recepción (p.u.)
4	7	$0.2849 + 0.0654i$	$-0.2849 - 0.0472i$
4	9	$0.1606 + 0.0426i$	$-0.1606 - 0.0267i$
5	6	$0.4391 - 0.1428i$	$-0.4391 + 0.2016i$

Los resultados anteriores son tomados forman el caso base y se toman como punto de partida para hacer una comparación del efecto del CUPP en el sistema, considerando los dos

modelos presentados en el capítulo tres. En el siguiente capítulo, sección 6.2.1, se presenta el análisis nodal de los flujos obtenidos en las Tablas 5.4 y 5.5.

#### 5.4 RESULTADOS DEL SISTEMA CON EL CUFP, MODELO COMPLETO

El modelo completo permite controlar todos los parámetros de la línea que son:

- ◆ Control sobre el voltaje en los nodos donde está conectado el equipo. Bajo este arreglo el dispositivo de control se comporta como un compensador en el nodo de envío y como un transformador con cambio de derivaciones (controlado en pequeños pasos finitos) sobre la línea, para darle al nodo de envío un control suave de voltaje.
- ◆ Control del valor de impedancia de la línea. Bajo este esquema el dispositivo se comporta como un compensador serie, similar en su efecto al capacitor serie controlado por tiristores. Un atributo favorable es que controla la impedancia de la línea de manera continua, entre un cierto rango de valores.
- ◆ Control de ángulo, bajo este tipo de funcionamiento se comporta como un transformador cambiador de fase o transformador defasador, dando un control suave de ángulo, y permitiendo un control directo del flujo de potencia real en la línea.

En el tema de sensibilidad presentado en el capítulo anterior se mostraron dos tablas de valores que representan factores de sensibilidad, donde se puede apreciar que el mejor efecto en todo el sistema se presenta cuando se instala el equipo en la línea 4-5, esta puede ser la localización idónea del equipo **FACTS**, pero analizando los resultados del sistema sin el efecto del **CUFP** se puede observar que el nodo 14 se encuentra cerca de su límite inferior de voltaje operativo. Por esta razón se determinó localizar el **CUFP** en la línea 9-14, ya que

presenta una mejor respuesta que al instalarlo en la línea 4-5, la cual sería otra línea que tendría efecto directo sobre el nodo 14.

Las condiciones iniciales de operación del equipo **CUFP** se pueden listar como:

El flujo de potencia propuesto para la línea 9-14, donde está conectado el equipo es una potencia real de 10 MW y una potencia reactiva de 5 MVAR's. El voltaje inicial  $V^{(0)}$  del equipo y el ángulo inicial  $\theta_s^{(0)}$ , se calculan por medio de (3.18) y (3.19), obteniendo los resultados que se dan en las Tablas 5.6, 5.7 y 5.8.

Para representar mejor el efecto del **CUFP** en el sistema se adiciona un nodo ficticio, el número 15, el cual queda a la salida del equipo, tal como se muestra en la Figura 5.2, donde  $Z_s$  es la impedancia del transformador serie de acoplamiento. Al representar de esta manera el equipo y la línea a que está asociado se puede observar el comportamiento del flujo por el equipo, el del nodo ficticio y el de la línea que se modela. El control del flujo de potencia es del nodo ficticio 15, al nodo 14 en el sistema estudiado.

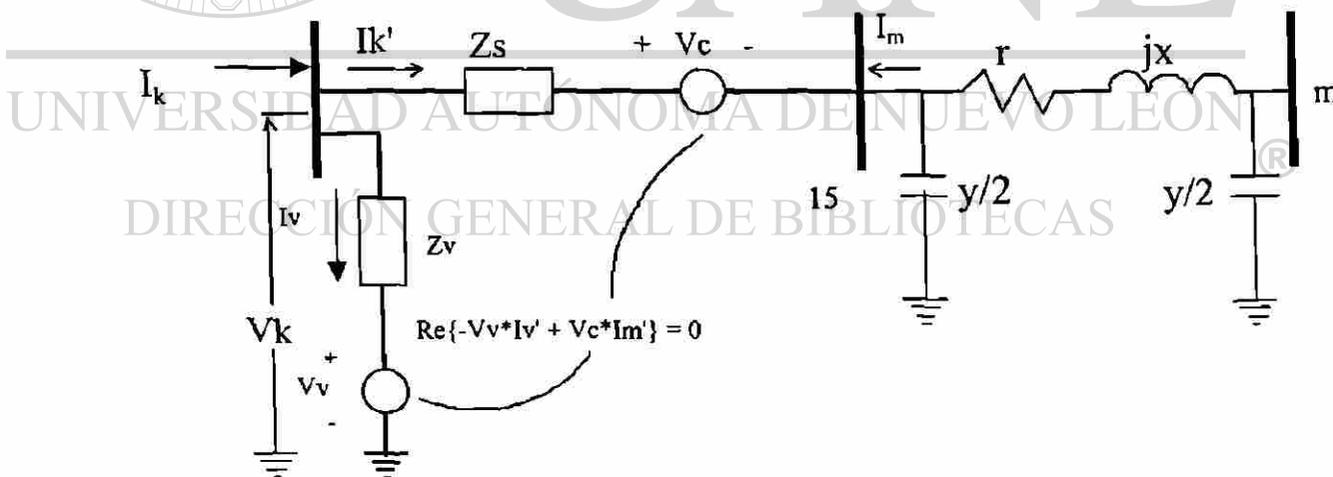


Fig. 5.2 Circuito equivalente del equipo en la línea con nodo ficticio.

TABLA 5.6 Voltajes y Angulos Nodales.

Nodo	Voltaje (p.u.)	Angulo (grados)
1	1.0600	0
2	1.0410	-4.9096
3	1.0000	-12.5993
4	1.0219	-10.4077
5	1.0295	-8.9171
6	1.0000	-15.2030
7	1.0160	-13.9363
8	1.0580	-13.9363
9	1.0000	-15.7907
10	0.9922	-16.0161
11	0.9925	-15.7665
12	0.9850	-16.1787
13	0.9806	-16.2867
14	0.9704	-17.3120
15	0.9965	-16.0862

TABLA 5.8 Flujos de Potencia en Transformadores.

Nodo de salida	Nodo de llegada	Flujo de salida (p.u.)	Flujo de llegada (p.u.)
4	7	$0.2989 - 0.0701i$	$-0.2989 + 0.0898i$
4	9	$0.1670 - 0.0096i$	$-0.1670 + 0.0255i$
5	6	$0.4169 - 0.1313i$	$-0.4169 + 0.1836i$

TABLA 5.7 Flujos de Potencia en Líneas.

Nodo de envío	Nodo de llegada	Flujo de envío (p.u.)	Flujo de llegada (p.u.)
1	2	$1.5614 - 0.1328i$	$-1.5192 + 0.2035i$
1	5	$0.7632 - 0.0084i$	$-0.7352 + 0.0703i$
7	9	$0.2989 + 0.1525i$	$-0.2989 - 0.1405i$
7	8	$0.0000 - 0.2423i$	$0.0000 + 0.2524i$
2	3	$0.7250 + 0.0670i$	$-0.7019 - 0.0151i$
2	4	$0.5633 - 0.0653i$	$-0.5462 + 0.0775i$
2	5	$0.4138 - 0.0700i$	$-0.4047 + 0.0614i$
3	4	$-0.2401 - 0.0469i$	$0.2440 + 0.0215i$
4	5	$-0.6418 + 0.0196i$	$0.6470 - 0.0165i$
6	11	$0.0547 + 0.0118i$	$-0.0544 - 0.0112i$
6	12	$0.0765 + 0.0227i$	$-0.0757 - 0.0210i$
6	13	$0.1737 + 0.0618i$	$-0.1715 - 0.0574i$
9	10	$0.0709 + 0.0657i$	$-0.0706 - 0.0649i$
14	15	$-0.0984 - 0.0466i$	$0.1000 + 0.0500i$
10	11	$-0.0194 + 0.0069i$	$0.0194 - 0.0068i$
12	13	$0.0147 + 0.0050i$	$-0.0146 - 0.0050i$
13	14	$0.0511 + 0.0044i$	$-0.0506 - 0.0034i$
15	9	$-0.0514 - 0.0353i$	$0.0514 + 0.0357i$

En el siguiente capítulo, apartado 6.2.2, se presenta el análisis por nodo de los flujos obtenidos en las Tablas 5.7 y 5.8, los cuales correspondientes al modelo completo del CUFEP y cómo interviene dicho elemento de control en el balance de potencia.

## 5.5 RESULTADOS DEL SISTEMA CON EL CUPF, MODELO SIMPLIFICADO

Este modelo sólo contempla el control de dos parámetros, los cuales son:

- ◆ Magnitud de impedancia de la línea. Bajo esta forma de control se observa un comportamiento similar al que tiene un compensador serie, y es similar a la que desarrolla un capacitor serie controlado por tiristores. El efecto es controlar la impedancia de la línea de manera suave.
- ◆ El control de ángulo. Para este caso se comporta como un transformador cambiador del ángulo de fase o transformador defasador, proporcionando un control suave del ángulo; cuyo efecto se refleja en el control de la potencia real.

El **CUPF** se supone conectado en la misma línea 9-14 y con la misma potencia a controlar que es de 10 MW en potencia real y 5 MVAR's de potencia reactiva, obteniendo los resultados de las Tablas 5.9, 5.10 y 5.11.

Para representar de una mejor manera el efecto del **CUPF** en el sistema se adiciona un nodo ficticio, siendo éste el número 15, a la salida del equipo, tal como se muestra en la Figura 5.3,  $Z_s$  es la impedancia del transformador de acoplamiento en conexión serie. Al representar de esta manera el equipo y la línea, se puede observar el comportamiento del flujo por el equipo, en el nodo ficticio y en la línea, el control del flujo de potencia se lleva a cabo del nodo ficticio 15 al nodo 14 en el sistema estudiado.

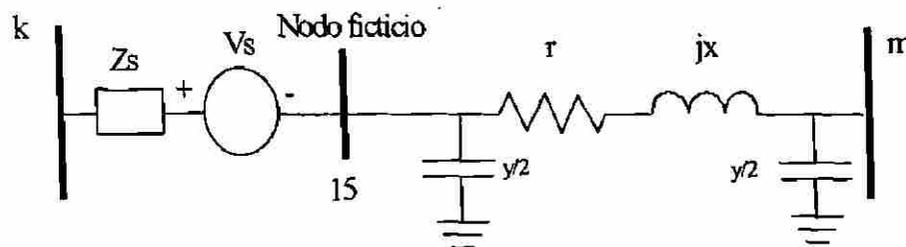


Fig. 5.3 Circuito equivalente del equipo en la línea y con el nodo ficticio.

TABLA 5.9 Voltajes y Angulos Nodales.

Nodo	Voltaje (p.u.)	Angulo (grados)
1	1.0600	0
2	1.0410	-4.9120
3	1.0000	-12.6142
4	1.0186	-10.3528
5	1.0273	-8.8988
6	1.0000	-15.3584
7	1.0051	-13.8587
8	1.0580	-13.8587
9	0.9783	-15.7358
10	0.9742	-15.9962
11	0.9833	-15.8212
12	0.9850	-16.3341
13	0.9806	-16.4422
14	0.9704	-17.4675
15	0.9965	-16.2416

TABLA 5.11 Flujo de Potencia en Transformadores.

Nodo de salida	Nodo de llegada	Flujo de salida (p.u.)	Flujo de llegada (p.u.)
4	7	$0.2928 - 0.0338i$	$-0.2928 + 0.0521i$
4	9	$0.1629 + 0.0230i$	$-0.1629 - 0.0076i$
5	6	$0.4274 - 0.1376i$	$-0.4274 + 0.1930i$

TABLA 5.10 Flujos de Potencia Real y Reactiva en líneas del SEP.

Nodo de salida	Nodo de llegada	Flujo de salida (p.u.)	Flujo de llegada (p.u.)
1	2	$1.5622 - 0.1329i$	$-1.5198 + 0.2038i$
1	5	$0.7625 + 0.0020i$	$-0.7345 + 0.0600i$
7	9	$0.2928 + 0.2496i$	$-0.2928 - 0.2335i$
7	8	$0.0000 - 0.3017i$	$0.0000 + 0.3176i$
2.	3.	$0.7262 + 0.0669i$	$-0.7029 - 0.0147i$
2.	4.	$0.5618 - 0.0459i$	$-0.5449 + 0.0577i$
2.	5.	$0.4149 - 0.0572i$	$-0.4057 + 0.0487i$
3.	4.	$-0.2391 - 0.0276i$	$0.2429 + 0.0021i$
4.	5.	$-0.6317 - 0.0100i$	$0.6369 + 0.0128i$
6.	11	$0.0653 + 0.0531i$	$-0.0646 - 0.0517i$
6.	12	$0.0765 + 0.0227i$	$-0.0757 - 0.0210i$
6.	13	$0.1737 + 0.0618i$	$-0.1715 - 0.0574i$
9.	10.	$0.0607 + 0.0251i$	$-0.0606 - 0.0247i$
14.	15	$-0.0984 - 0.0466i$	$0.1000 + 0.0500i$
10.	11	$-0.0294 - 0.0333i$	$0.0296 + 0.0337i$
12	13	$0.0147 + 0.0050i$	$-0.0146 - 0.0050i$
13	14	$0.0511 + 0.0044i$	$-0.0506 - 0.0034i$
15	9	$-0.0861 + 0.1808i$	$0.0861 - 0.1768i$

En el capítulo siguiente, apartado 6.2.3, se muestra el análisis por nodo de los flujos obtenidos en las Tablas 5.10 y 5.11, resultados que corresponden al modelo simplificado y se analiza cómo interviene el CUPF en el balance de potencia.

## 5.6 CARACTERÍSTICA DE CONVERGENCIA DEL PROCESO ITERATIVO

En esta sección se reporta sobre las características de convergencia observadas al localiza en diferentes líneas del sistema el equipo CUPF usando los mismos datos para el

dispositivo, teniendo esta parte del trabajo el objeto de analizar la posible degradación de las características de convergencia del proceso iterativo debido a la localización del CUFP en el sistema. Se observó que el número de iteraciones para lograr la convergencia del proceso iterativo con el equipo CUFP varía de acuerdo a la línea en que se instala el equipo. En la Tabla 5.12 se muestra el número de iteraciones para tener convergencia, considerando ambos modelos del equipo CUFP, es decir, tanto para el modelo completo como para el modelo simplificado.

TABLA 5.12 Convergencia del sistema al localizar el CUFP en diferentes líneas.

NSF→NLIF	It M. C.	It. M. S.	NSF→NLIF	It M. C.	It. M. S.
5→4	6	7	4→5	8	7
9→14	6	4	14→9	6	4
9→10	9	8	10→9	14	4
11→10	10	6	10→11	10	6
12→13	8	6	13→12	8	6
13→14	7	11	14→13	7	7

NSF      Nodo de Salida del CUFP

NLIF    Nodo de Llegada del CUFP

It. M. C.   Iteraciones del Modelo Completo

It. M. S.   Iteraciones del Modelo Simplificado

En la Tabla 5.12 se tiene un resumen de la convergencia hacia la solución para el sistema, dependiendo de la línea en que se instala el CUFP. La variación de estas características de convergencia, según opinión del autor, es consecuencia de que al fijar el flujo de potencia por una línea, este flujo puede estar en la misma dirección u opuesto al flujo de la línea cuando no se considera instalado el equipo, por lo cual el grado de compensación que debe proporcionar el equipo es diferente, ya que en algunas líneas el CUFP debe no sólo debe modificar, sino incluso invertir la dirección original que tiene el flujo de potencia.

Los resultados anteriores se obtienen para un flujo de potencia estipulado como constante sobre la línea, y para observar cómo varía el número de iteraciones a medida que se modifica el valor de la potencia especificada, el cual es el valor a controlar sobre la línea. En la Tabla 5.13 se observa que se obtiene un menor número de iteraciones para un cierto valor de potencia, el cual se lista para varias líneas.

TABLA 5.13 Valor de potencia real y reactiva al obtener solución en el menor número de iteraciones.

Línea	Modelo Completo			Modelo Simplificado		
	P (MW)	Q (MW)	Iteración	P (MW)	Q (MW)	Iteración
5→4	-15	-6.5	6	20	10	6
9→14	11	5.8	5	10	5	4
9→10	9.5	4.75	7	13	9.5	5
11→10	-6.5	-4	7	10	5	6
12→13	-10	-5	8	8.5	305	5
13→14	10	5	7	15	12	6

## 5.7 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la convergencia del proceso iterativo, usando uno de los dos modelos del CUFPP indican que se tiene una respuesta apropiada en lograr el control de los flujos de potencia en el sistema. En el modelo completo los voltajes nodales del sistema se mejoran notablemente, en especial en los nodos de los extremos a la línea donde está instalado el equipo. Los ángulos de los voltajes nodales en los extremos de la línea no tienen un cambio significativo, ya que el sistema está lo suficientemente conectado. El flujo de potencia por la línea, una vez que se alcanza la solución del proceso iterativo, cumple con el valor especificado, dentro de la tolerancia previamente especificada.

Para el modelo simplificado la respuesta obtenida cumple con el cometido del buscado al analizar el control, es decir, se logra mantener el flujo de potencia establecido como valor a

controlar sobre la línea, pero en este modelo no se compensa el nodo de envío de la línea donde está localizado el equipo; sin embargo se exige un cierto valor del flujo por la línea y al hacerlo se mejora ligeramente el voltaje, y no se observa degradación del ángulo nodal. En general los dos modelos analizados cumplen con los dos objetivos principales al modelar y estudiar el impacto sobre el sistema de la presencia de elementos tipo **FACTS** en el sistema de potencia, que son:

- ◆ El incrementar la capacidad de transferencia de las líneas de transmisión.
- ◆ El proporcionar un control directo del flujo de potencia por trayectorias de transmisión deseadas.

La localización del **CUFP** en un sistema de potencia puede hacerse depender, en primera instancia, de información que proporciona la matriz de sensibilidad a fin de determinar en qué punto es conveniente ubicar el equipo para que proporcione el efecto deseado en el sistema o en una área del mismo. En este caso el equipo se instaló en la línea 9-14, debido al bajo voltaje observado originalmente en el nodo 14.

Se observó que la convergencia del proceso iterativo depende de la ubicación del equipo en el sistema, tal como se mostró en la Tabla 5.12. Las pruebas se efectuaron con el mismo flujo de potencia propuesto como valor a ser controlado, y en algunas líneas donde se instala el equipo el proceso iterativo presenta una característica divergente.

En la Tabla 5.13 se presentaron resultados del sistema de estudio al variar la potencia de transferencia por la línea donde está instalado el equipo **CUFP**, en este caso se buscó el valor de potencia para tener una convergencia más rápida. Para lograr una mayor experiencia de los efectos del equipo en el sistema se trabajó la solución numérica en donde se muestra que si se cambia la transferencia de potencia requerida por la línea, se cambia la rapidez de convergencia, normalmente en una o dos iteraciones.

## CAPITULO 6

### ANALISIS DE RESULTADOS

#### 6.1 INTRODUCCION

Los resultados obtenidos en el capítulo anterior se analizan para observar los efectos del CUFPP en el sistema de transmisión, comprobando que el balance de potencia nodal se satisface, logrando también que el sistema esté dentro de sus límites operativos, así como dentro de los rangos de operación permitidos para el equipo eléctrico.

La característica operativa del equipo está determinada por la potencia de diseño, la cual se especifica por dos factores [12]:

1. La potencia que maneja el equipo durante su operación normal, la cual está dictada por la capacidad de los dos transformadores que forman parte del equipo con respecto a la línea, es decir, el transformador en derivación y el transformador serie.
2. La capacidad de voltaje y de corriente para la que estén diseñados los SCRs, mejor conocidos como tiristores (GTO), éstos elementos se diseñan para manejar una determinada corriente y una diferencia de potencial entre sus terminales de entrada y salida.

La potencia que es posible inyectar al sistema está determinada por la corriente y el voltaje de salida del CUFPP, el arreglo del inversor es tal que trabaja en los cuatro cuadrantes del plano de corriente y voltaje, por tanto, puede trabajar como convertidor o como inversor según lo requiera el sentido del flujo de potencia. El capacitor que sirve de encadenamiento de CD proporciona la posibilidad de almacenar energía y por medio del control, que incide directamente sobre el disparo de los arreglos de tiristores, se puede manejar el defasamiento

de la corriente respecto al voltaje, en el circuito de CA; lo cual permite tener aportar o tomar potencia reactiva hacia o del sistema a través de los transformadores. Por lo expuesto, este modelo se considera como formado por dos fuentes de compensación síncrona: una fuente en serie y la otra fuente en paralelo, pero enlazadas a través de un circuito de CD por medio del elemento capacitivo [3].

## 6.2 ANALISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de los casos del capítulo anterior, se presta especial atención a la línea conectada entre los nodos 9 y el 14, donde al insertar el CUF. En esa línea se adiciona un nodo ficticio, el número 15. Se lleva a cabo una suma de potencias en los nodos extremos de la línea donde se instaló el equipo FACTS, lo cual se realiza para los tres resultados obtenidos, esto es: sin el equipo o caso base, después considerando el equipo CUF pero usando el modelo completo y el caso cuando se usa el modelo simplificado.

### 6.2.1 Análisis de resultados sin el CUF

En la Figura 6.1 se muestra los balances nodales en los nodos 9 y 14, para tener un caso base y observar los cambios al resolver el sistema con los dos modelos del CUF. El resultado de la suma de potencias en los nodos es prácticamente cero. La tolerancia usada durante el proceso iterativo del problema de flujos fue 0.001 pu, la cual se establece como criterio de convergencia a fin de que se cumpla el balance nodal en el sistema.

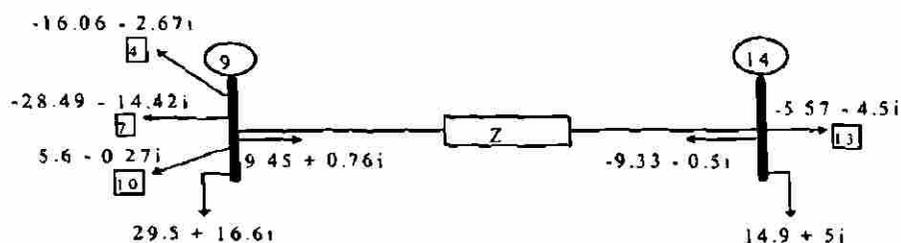


Fig. 6.1 Balance de potencia nodal, nodos 9 y 14.

### 6.2.2 Análisis de resultados considerando el modelo completo

En el balance nodal de la Figura 6.2, además de considerar la potencia reactiva de la línea, también se toma en cuenta la potencia que el CUFP inyecta al sistema, tal como se explicó en el capítulo 2. La característica del CUFP es que puede aportar potencia reactiva en ambos nodos o tomar potencia reactiva para ajustar al valor preestablecido para la potencia a transferir por la línea. Los modos de operación descritos deben tomarse en cuenta al determinar la potencia del equipo, en la fase de diseño y posteriormente durante la operación determinan los límites. El flujo de potencia del nodo 9 y del nodo 15 es la suma del flujo por la línea más la potencia que maneja el CUFP, el flujo por la línea de 9 a 15 es de  $(5.14 + j 3.57)$  en MVAs y por la línea de 15 a 9 es de  $(-5.14 - j3.53)$  MVAs. En cambio en el elemento CUFP en el nodo 9 se tiene un valor de  $(4.86 - j15.24)$  MVAs y en el nodo 15 es de  $(-4.86 - j1.47)$  MVAs.

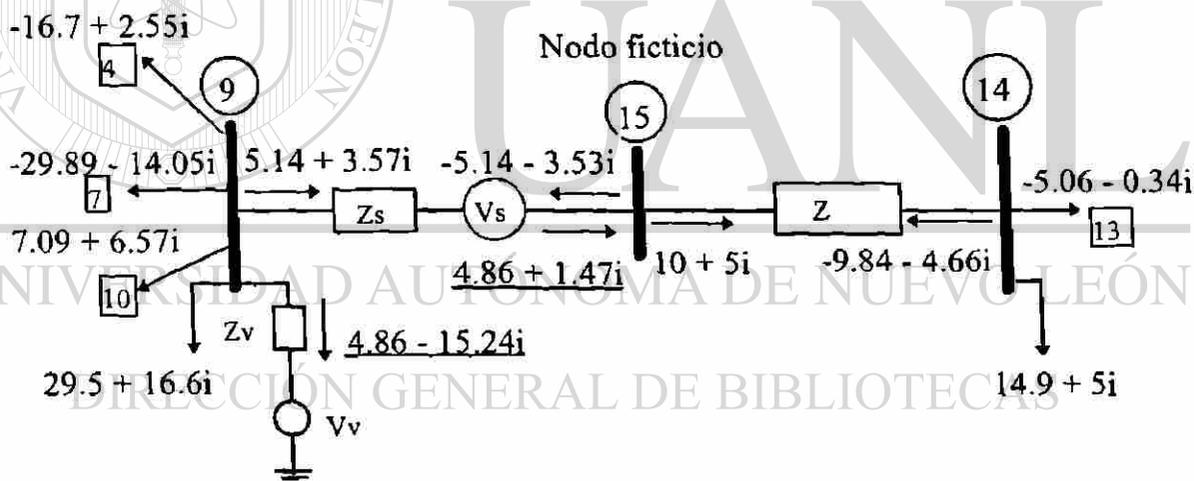


Fig. 6.2 Flujos de potencia por la línea y por el CUFP, modelo completo.

### 6.2.3 Análisis de resultados, modelo simplificado

Para el modelo simplificado, los resultados de la suma en nodos se muestran en la Figura 6.3, y además de considerar la potencia de la línea se toma en cuenta la potencia

reactiva que el CUFPP aporta al sistema, tal como se explicó en el Capítulo 2. La característica del CUFPP es que puede inyectar potencia reactiva en ambos nodos o tomar potencia reactiva para ajustar la transferencia de potencia por la línea. Los modos de operación descritos deben tomarse en cuenta al determinar la potencia del equipo. El flujo de potencia del nodo 9 y del nodo 15 es la suma del flujo en la línea más el del CUFPP, por la línea del 9 al 15 fluye  $(8.61 - j 17.68)$  MVAs, y de 15 a 9 fluye  $(-8.61 + j18.08)$  MVAs. El CUFPP en el nodo 9 toma  $(1.39 + j 22.68)$  MVAs y en el nodo 15 la potencia es  $(-1.39 + j 23.08)$  MVAs.

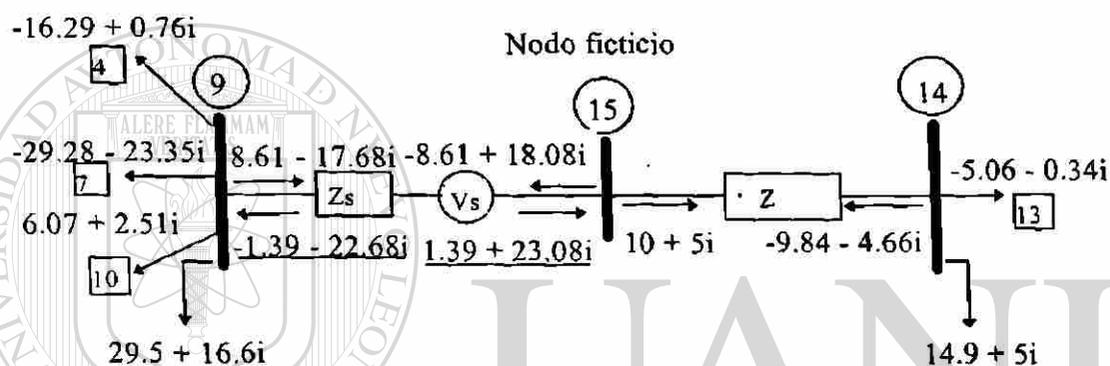


Fig. 6.3 Flujos de potencia por la línea y por el CUFPP, modelo simplificado.

### 6.3 COMENTARIOS SOBRE LOS RESULTADOS ANALIZADOS

Con los balances calculados en los nodos que se muestra se comprueba que la suma de potencias en cada nodo es prácticamente cero, dentro de una tolerancia especificada. Los valores obtenidos son consecuencia de la tolerancia manejada dentro del proceso iterativo la cual se tomó como 0.001 p.u., y con ella se probó convergencia.

El análisis de otros casos estudiados muestra un comportamiento similar al ya presentado. De la potencia que maneja el CUFPP hacia el sistema, una parte es la que se toma por el convertidor asociado al transformador en derivación, y la otra parte de potencia que mantiene el balance se llega a tomar de la energía almacenada en el capacitor, colocado en el

circuito de CD. Con los balances de potencia en los nodos, tal como se mostró se tiene que el CUFPP, tanto en su modelo completo como en el modelo simplificado, provocan un impacto significativo en el sistema de potencia, lo cual es objeto de estudio y evaluación en este trabajo. También se trata de estudiar de qué manera se puede cuantificar el impacto de la presencia de este equipo, no solamente en la vecindad cercana a su localización, sino al sistema como un todo.

El modelo completo presenta un efecto de compensación reactiva aceptable en el sistema, lo cual se observa en la Tabla 5.3 del capítulo anterior, en dicha tabla se muestran los valores de voltaje para los nodos extremos en los que está conectado al equipo. Este equipo de compensación se debe instalar generalmente en líneas donde los nodos terminales no son nodos tipo generador, ni entre aquellos nodos que funcionan como compensador, para que el efecto del equipo FACTS sea realmente de beneficio al control de los nodos terminales. También se observa que el efecto en otros nodos del sistema, cercanos eléctricamente al elemento de transmisión donde se instala el CUFPP, tienen una mejora notable en sus valores de voltaje. Los valores de los ángulos de los voltajes nodales no se modifican sensiblemente debido a que el sistema está fuertemente conectado, pero si el sistema presenta una configuración radial o de naturaleza longitudinal, las tendencias a tener mayores diferencias angulares se harán más evidentes.

Para el caso del CUFPP, cuando se representa por un modelo simplificado, permite observar que se controla el flujo de potencia por la línea, pero no se tiene compensación en el nodo de envío donde está conectado el elemento y por tanto no se mejora notablemente el perfil de voltaje, esto se puede observar en la Tabla 5.6. Los ángulos de los voltajes nodales cambian ligeramente, ya que no hay compensación en el nodo de envío, sólo en el nodo de recepción para cambiar a valores por medio de los cuales se obtiene el flujo especificado [3].

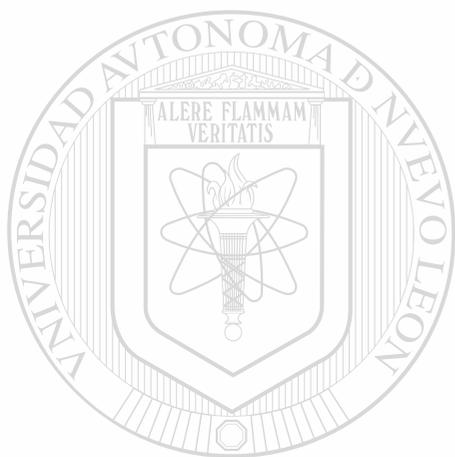
## 6.4 OBSERVACIONES GENERALES

Con los resultados obtenidos en la solución del sistema de prueba de 14 nodos del IEEE, y considerando el equipo en cualquiera de sus dos modelos, por los resultados dados en las Tablas del Capítulo 5 y el análisis presentado en este capítulo, se muestra que el **Control Unificado de Flujo de Potencia (CUFP)** tiene una característica completa de control sobre el flujo de potencia en la línea en la cual se instala. En los nodos extremos a la línea donde se conecta el equipo **CUFP** se tiene una compensación reactiva, estos nodos tienen un valor de voltaje de 1 p.u. o un valor muy próximo. Los voltajes del equipo,  $V_s$  y  $V_v$  son los voltajes de las terminales de salida de los convertidores serie y paralelo respectivamente, con magnitud y ángulo. Estos voltajes se representan por fuentes de tensión, las cuales se muestran en la Figura 3.1. Las impedancias serie y paralelo corresponden al equipo asociado a los convertidores y a los transformadores que conectan el equipo al sistema de alta tensión [4].

El modelo simplificado considera que se tiene un factor de potencia unitario en los nodos terminales de la línea donde está conectado el **CUFP**, por tal motivo este modelo no efectúa acciones de compensación en el nodo de envío, sólo considera que existe una fuente de voltaje en serie con la línea, por esta razón sólo se calcula  $V_s$  con magnitud y ángulo. Esta fuente se muestra en la Figura 3.2.

Los dos modelos del elemento **CUFP**, tanto el completo como el simplificado, se incluyeron en diferentes redes para analizar los efectos sobre el sistema de potencia y se obtuvo un buen comportamiento de convergencia para los procesos iterativos. Al conectarse centrales generadoras con características diferentes a las convencionales, como es el caso de los cogeneradores, o bien de los productores independientes, los flujos de potencia pueden tomar rutas de flujo inciertas en el sistema, provocando posibles trastornos operativos y posibles violaciones de límites físicos para los elementos de transmisión o bien a los márgenes de seguridad del sistema. En cuanto al **CUFP**, al presentarse como un elemento versátil de control para los sistemas eléctricos de potencia, se augura que cobrará una

importancia creciente y que tendrá un gran impacto en la operación y el control de los sistemas de potencia, permitiendo el manejo de los flujos a ser transmitidos por trayectorias eléctricamente más convenientes a fin de mantener el balance en el sistema y a contribuir para operarlo dentro de márgenes de seguridad preestablecida por los administradores y analistas del sistema.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## CAPITULO 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 INTRODUCCION

En este capítulo se presentan los aspectos más importantes de este trabajo de investigación, las aportaciones del mismo y se mencionan algunas recomendaciones para ser abordados en trabajos futuros relacionados con los **FACTS**, especialmente estudios sobre el equipo **CUFP**. Lo anterior debido a que se considera al **CUFP** como uno de los equipos de control más completos, que aún está en desarrollo y sujeto a pruebas en prototipos y en laboratorios de simulación digital, así también se sigue investigando para obtener el mayor provecho posible al incluirse en sistemas eléctricos durante la operación y el control de los sistemas eléctricos de potencia.

#### 7.2 CONCLUSIONES GENERALES

- ◆ Los modelos analizados en este trabajo se implementaron en el algoritmo de flujos de potencia con base en el método de Newton-Raphson en su forma polar. El algoritmo fue modificado apropiadamente para incluir los modelos del **CUFP**® y así poder analizar sus efectos.
- ◆ Las cargas en el presente estudio se modelaron como potencia constante. La razón es que además de carecer de otro tipo de información más realista sobre la carga, por ejemplo su dependencia en función del voltaje, se puede pensar que el modelo usado provoca un efecto drástico sobre el sistema de prueba.
- ◆ El dispositivo **FACTS** y cuyo modelado se abordó en esta investigación, es una alternativa técnica y seguramente competitiva desde el punto de vista económico en un futuro cercano, para controlar el flujo de potencia en líneas de transmisión,

así como para incrementar la capacidad de transmisión en estado estable para los sistemas eléctricos de potencia.

- ◆ El equipo **CUFP** tiene la capacidad de regular el flujo de potencia por una línea a un valor deseado. Esta característica lo hace apropiado para tener un mejor control de transferencia de potencia sobre los enlaces de interconexión para diferentes áreas eléctricas.
- ◆ Los modelos del **CUFP** modifican las ecuaciones del modelo matemático, lo cual se refleja en el proceso iterativo tipo Newton-Raphson, y en general se observó que al proceso iterativo le toma un número mayor de iteraciones en converger, respecto al caso de no incluir dicho equipo.
- ◆ Los resultados para los dos modelos presentados cumplen con las expectativas fijadas en el desarrollo del presente trabajo, el cual fue fijado como: el controlar el flujo de potencia por una línea establecida en un valor deseado, con la ayuda de un dispositivo moderno y flexible, basado en la electrónica de potencia.
- ◆ La inclusión del modelo desarrollado para el equipo **CUFP**, en el procedimiento iterativo Newton-Raphson en forma polar, altera la estructura de las expresiones de la potencia en los nodos, así como las expresiones de la potencia real y reactiva que viaja por el elemento de transmisión en combinación con el elemento **CUFP** y por tanto también se altera la configuración de la matriz Jacobiana del sistema de ecuaciones linealizado. Estos cambios son diferentes para cada modelo, tal como se mostró en el Capítulo 3.

### 7.2.1 Conclusiones para el modelo completo

- ◆ El control de los flujos de potencia en un sistema eléctrico depende del control de variables, tales como la magnitud de voltaje en el nodo de envío y/o en el nodo de recepción, depende del defasamiento angular y de la reactancia del elemento de

transmisión; esto es:  $|V|$ ,  $\theta$  y  $X$ . El equipo CUFPP permite el control de las variables mencionadas, de manera separada o en forma conjunta y por tanto puede controlar la potencia, tanto activa como reactiva, que fluye por la línea.

- ◆ Con la utilización del modelo completo del CUFPP, al permitir una mejor representación del equipo, es posible controlar el voltaje en un valor constante en los nodos donde está conectado el equipo y en los nodos remotos se mejora notablemente el perfil de voltaje, dependiendo del alcance del efecto, mismo que se puede evaluar por medio de coeficientes de sensibilidad.
- ◆ El ángulo nodal cuando se usa el modelo completo se reduce ya que la compensación se tiene en ambos nodos donde está conectado el equipo, y debido a que en este caso el dispositivo se comporta como un compensador estático de VARs en ambos extremos. Por lo expuesto se mantiene un perfil constante de voltaje y una reducción en el valor de la diferencia angular.
- ◆ En las pruebas realizadas con el modelo completo y con el modelo simplificado este último presenta una convergencia más rápida, según se observa en las Tablas 5.5 a 5.12, que forman parte del capítulo 5.

### 7.2.2 Conclusiones para el modelo simplificado

- ◆ El modelo simplificado permite tener control del flujo de potencia por la línea en un valor especificado, pero no se tiene el efecto de una compensación en el nodo de envío donde está conectado el CUFPP.
- ◆ Como el modelo simplificado hace que se cumpla con un valor de transferencia de potencia por la línea donde está conectado el equipo, el voltaje en los nodos de voltaje no controlado se observa que crece ligeramente comparado con el efecto que produce el modelo completo, en el caso de bajar el valor de la potencia transferida respecto al caso base.

- ◆ La diferencia angular se incrementa, en el caso de aumento del flujo de potencia, ya que no se tiene compensación en el nodo de envío en los extremos de la línea donde se instala el CUPP.
- ◆ Se observa que el modelo simplificado presenta mejor características de convergencia, cuando se establece cierta potencia de transferencia en alguna de las líneas del sistema de prueba. Los valores obtenidos son similares a los que se observan en el modelo completo.

### 7.3 APORTACIONES DEL TRABAJO DE INVESTIGACION

- ◆ Se aplicaron modelos lineales desacoplados, con interpretación de circuito equivalente, para la potencia real y para la potencia reactiva que viaja por los elementos de transmisión. Esto permite obtener un modelo de red que arroja valores de coeficientes de sensibilidad, los cuales se pueden usar de manera preliminar para ubicar controles en redes eléctricas, así como valorar el efecto de los controles sobre los flujos en elementos de transmisión de todo el sistema que se analiza.

- ◆ Se presentaron de manera sencilla y directa dos modelos para estudios de estado estable del equipo CUPP, así como las modificaciones necesarias a los algoritmos implementados en forma de Newton-Raphson en su versión polar para el proceso iterativo de flujos.

- ◆ Se probaron ampliamente los dos modelos del equipo CUPP, uno completo y uno simplificado para analizar las características de convergencia y concluir sobre cual es el impacto sobre el sistema de transmisión.

#### 7.4 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

- ◆ El autor sugiere extender la investigación al comportamiento dinámico de este equipo, incluyendo su sistema de control, a fin de valorar su respuesta ante problemas de estabilidad transitoria y de estabilidad dinámica en el sistema de potencia.
- ◆ Es deseable investigar la respuesta de este equipo ante fallas, y/o efectuar análisis de fenómenos transitorios, los cuales están relacionados con la operación en los cuatro cuadrantes para los convertidores y el equipo asociado.
- ◆ Estudiar los requerimientos de equipo auxiliar del CUFP y su diseño, como pueden ser los filtros requeridos para armónicas, a fin de lograr una operación que cumpla con criterios de calidad de la energía.
- ◆ Estudiar y evaluar el impacto que el equipo tipo CUFP tendrá sobre dispositivos de protección del sistema, en cuanto a ajustes y funciones requeridas. Así mismo la protección del propio equipo y sus diferentes modos de operación deben comprenderse cabalmente para integrarlos apropiadamente a la protección convencional ya existente en el sistema de potencia.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## REFERENCIAS

- [1] Paper Prepared by the FACTS Term & Definitions Task Force the FACTS Working Group of the DC and FACTS Subcommittee, "PROPOSED TERM AND DEFINITIONS FOR FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEM (FACTS)," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1848-1853, October, 1997.
- [2] Hingorani N. G. "Flexible AC Transmission Systems," IEEE Spectrum, pp. 40-45, April, 1993.
- [3] C. R. Fuerte-Esquivel, E. Acha, "The Unified Power Flow Controller: A Critical Comparison of Newton-Raphson UPFC Algorithms in Power Studies," Department of Electrical Engineering, University of Glasgow, Scotland, UK, 1997.
- [4] IEEE Power Engineering Society/CIGRE: "FACTS Overview," Special Issue, 95TP108, IEEE Service Center, Piscataway, N. J., 1995.
- [5] A. Edris, A. S Mehraban, M. Rahman, L Gyugyi, S. Arabi, T. Reiman, "Controlling the Flow of Real and Reactive Power," IEEE Computer Applications in Power, January, 1998.
- [6] Douglas J. Gotham, G. T. Heydt, "POWER FLOW CONTROL AND POWER FLOW STUDIES FOR SYSTEM WITH FACTS DEVICES," IEEE. Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 1, February, 1998.
- [7] Einar V. Larsen (F), Juan J Sánchez-Gasca, Joe H. Chow (F), "CONCEPTS FOR FACTS CONTROLLERS TO DAMP POWER SWINGS," IEEE 94 SM 532-2 PWRs.
- [8] L. Gyugi, C. D. Schauder, S. L. Williams, T.R. Rietman, D. R. Torgerson, A. Edris, "THE UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER: A NEW APPROACH TO POWER TRANSMISSION CONTROL," IEEE, 94 SM 474-7 PWRD.
- [9] Narain G. Hingorani, "POWER ELECTRONICS IN ELECTRIC UTILITIES: ROLE OF POWER ELECTRONIC IN FUTURE POWER SYSTEMS," Proceedings of the IEEE, Vol. 76, No. 4, April, 1988.
- [10] K. S. Smith, L. Ran, J. Penman, "DYNAMIC MODELLING OF A UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER," IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 144, No. 1, January 1997.
- [11] F. Aboytes, "CONTROL DE SERVICIO DE TRANSMISION MEDIANTE SISTEMAS DE TRANSMISION FLEXIBLE," Programa Doctoral FIME-UANL.

- [12] C. R. Fuerte-Esquivel, E. Acha, S. G. Tan, J. J. Rico, "Efficient Object Oriented Power System Software for the Analysis of Large Scale Networks Containing FACTS-Controlled Branch," IEEE, PE-158-PWRS-0-12-1997.
- [13] C. R. Fuerte-Esquivel, E. Acha, "A NEWTON-TYPE ALGORITHM FOR THE CONTROL OF POWER FLOW IN ELECTRICAL POWER NETWORKS", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 12, No. 4, November, 1997.
- [14] Yousin Tang, A. P. Sakis Meliopoulos, "Power System Small Signal Stability Analysis with FACTS Elements," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12 No. 3, July, 1997.
- [15] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari, G. Anderson, "USE OF UPFC FOR OPTIMAL POWER FLOW CONTROL," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October, 1997.
- [16] Fred C. Schweppe, "Power System '2000': Hierarchical Control Strategies," IEEE Spectrum, July 1978.
- [17] G. T. Heydt, W. Tan, T. LaRose, M. Negley, "SIMULATION AND ANALYSIS OF SERIES VOLTAGE BOOST TECHNOLOGY FOR POWER QUALITY ENHACEMENT," IEEE Transaction on power Delivery, December, 1997.
- [18] R. J. Nelson, S. L. William, "TRANSMISSION SERIES POWER FLOW CONTROL," IEEE Transaction on power Delivery, Vol. 10, No. 1, January, 1995.
- [19] Alfonso López Delgado, Salvador Acha, "Estudios de Flujo de Potencia con Elementos CUFP (Controlador Unificado de Flujo de Potencia)," CIECE'98, Instituto Tecnológico de Durango, Durango, Dgo. Ponencia 72, Abril, 1998.
- [20] Ramiro Patiño Bedolla, "ANALISIS Y CONTROL DE FLUJO DE POTENCIA EN ESTADO ESTABLE," Tesis de Maestría, Programa Doctoral FIME-UANL, Julio 1996.
- [21] Mohan, Undeland, Robbins, "POWER ELECTRONICS: CONVERTERS, APPLICATIONS AND DESIGN," John Wiley & Sons, 1989.
- [22] Marija D. Ilic and Shell Liu, "Hierarchical Power System Control its Valve in a Changing Industry," Springer-Verlag, 1996.
- [23] John J. Grainger, Willian D. Stevenson Jr "POWER SYSTEM ANALYSIS," McGraw-Hill, 1994.
- [24] Canadian Electrical Association, "STATIC COMPENSATORS FOR REACTIVE POWER CONTROL," Context Publication, 1984.

- [25] Florencio Aboytes García (Editor), "CONTROL DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA," Centro Nacional de Control de Energía, CFE, Programa Doctoral en Ing. Eléctrica, FIME-UANL, México, Mayo, 1991.
- [26] N. G. Hingorani, "FACTS - FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEM," Electric Power Research Institute, USA.
- [27] C. R. Fuerte-Esquivel, E. Acha, "Newton-Raphson Algorithm for the Reliable Solution of Large Power Networks with Embedded FACTS Devices," IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 143, No. 5, September, 1996.
- [28] C. D. Schauder, L. Gyugyi, M. R. Lound, D. M. Hamai, T. R. Rietman, D. R. Torgerson, A. Edris, "OPERATION OF THE UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER (UPFC) UNDER PRACTICAL CONSTRAINTS," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, April, 1998.
- [29] B. Sitot, "Fast Decoupled Load Flow", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-93, PP. 859-869, May/June, 1974.
- [30] Show-Kang Chang, Vladimir Brandwajn, "Adjusted Solutions in Fast Decoupled Load Flow," IEEE Transaction on Power System, Vol. 3, No. 2, PP. 726-733, May, 1988.
- [31] R. R. Shoults, "Sensitivity Analysis in Power System Using Decoupled Load Flow Models," University of Texas at Arlington, ESRC, Arlington, Texas, 1983.
- [32] Florencio Aboytes García at al., "Análisis de Sistemas de Potencia," Centro Nacional de Control de Energía, CFE, Programa Doctoral FIME-UANL, 1990.

