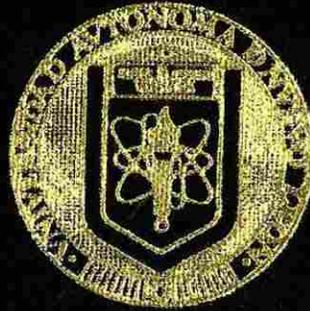


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



ANALISIS Y CONTROL DE FLUJOS DE POTENCIA
EN ESTADO ESTABLE

T E S I S

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

P R E S E N T A

RAMIRO PATIÑO BEDOLLA

MONTERREY, N. L.

JULIO DE 1995

ANÁLISIS Y CONTROL DE FLUJOS DE POTENCIA
EN ESTADÍSTICA ESTABLE

TM

Z5853

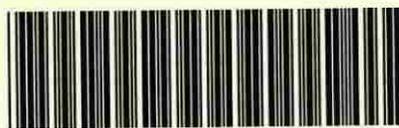
.M2

FIME

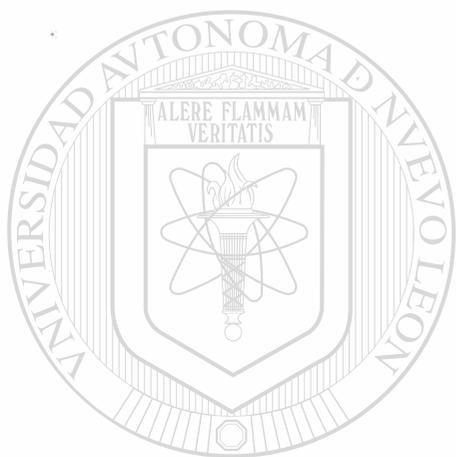
1995

R3

1995



1020112510



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

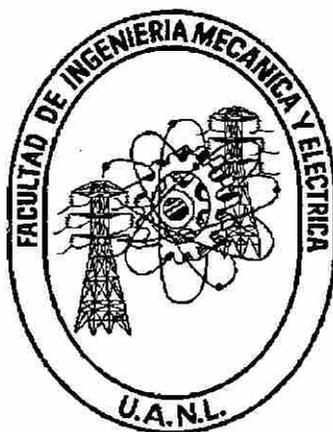


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**ANALISIS Y CONTROL DE FLUJOS DE POTENCIA EN ESTADO
ESTABLE**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

TESIS

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

PRESENTA

RAMIRO PATIÑO BEDOLLA

MONTERREY, N. L.

JULIO, 1995

**ANALISIS Y CONTROL DE FLUJOS DE POTENCIA EN ESTADO
ESTABLE**

Los miembros del comité aprueban la Tesis
de Maestría de Ramiro Patiño Bedolla

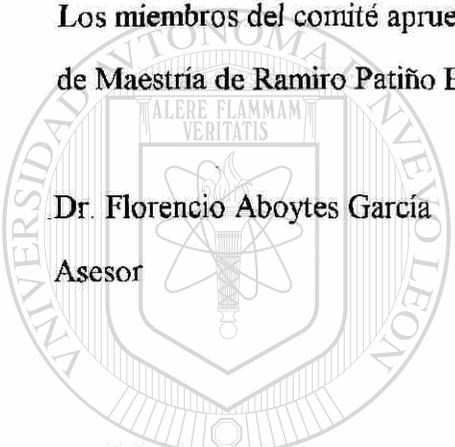
Dr. Florencio Aboytes García
Asesor



Dr. Salvador Acha Daza



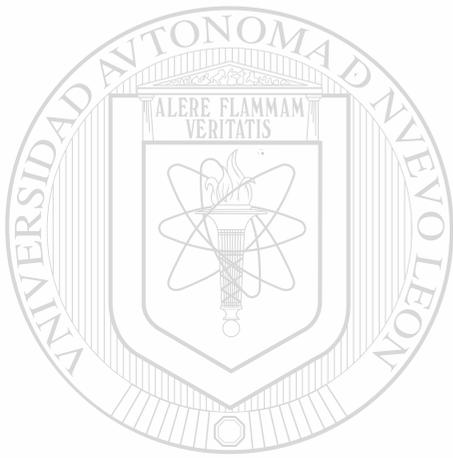
Dr. Rogelio Ramirez Barradas



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



FONDO TESIS

Agradezco a *Dios* por permitir mi existencia en este tiempo de cambios.

Con Amor y respeto a mis Padres:

Manuel Patiño Padilla y Elvira Bedolla de Patiño.

Por esa unión familiar que siempre ha existido, por su paciencia para conmigo, su cariño, sus consejos, su apoyo incondicional, por guiarme siempre por el camino del bien. Agradezco infinitamente sus desvelos y sus esfuerzos.

Al Sr. *Alfredo Jaramillo Pérez.*

Por sus valiosos consejos llenos de experiencia y su apoyo (moral, espiritual y económico) siempre presente, en el momento adecuado.

A mi tía *Socorro* y a mi prima *Paty.*

Por sus consejos y por darme ánimo de seguir adelante.

A Dora Alicia.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



AGRADECIMIENTOS

Al Dr. *Florencio Aboytes García* mi gratitud, reconocimiento y admiración por la asesoría de este trabajo, por compartir sus conocimientos y su valiosa experiencia, por la confianza brindada durante el desarrollo y por el apoyo económico para la culminación.

A los Profesores sinodales por los valiosos comentarios y sugerencias para mejorar esta tesis.

Al Dr. *Salvador Acha Daza* por haberme invitado a formar parte del Programa Doctoral, por el apoyo económico brindado y por sus valiosos y acertados comentarios y sugerencias.

Al M.C. *Carlos Pérez Rojas* próximo y futuro Dr. por su amistad, sus comentarios siempre importantes y por el apoyo económico, gracias al cuál fue posible concluir esta etapa profesional. De la misma forma al Dr. Oscar L. Chacón M., al Dr. Ernesto Vázquez Martínez, a mis compañeros y amigos Ismael Díaz Verduzco y Guillermo Francis Medina.

A todos y cada uno de mis maestros y compañeros del programa doctoral de la UANL y del CENACE por la amistad que me han brindado.

A la *Universidad Autónoma de Nuevo León* por el apoyo durante todo este tiempo.

Al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*. (CONACyT) el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios de maestría.

RESUMEN

ANÁLISIS Y CONTROL DE FLUJOS DE POTENCIA EN ESTADO ESTABLE

Publicación No. _____

Ramiro Patiño Bedolla, M.C. en Ingeniería Eléctrica

Universidad Autónoma de Nuevo León, 1995

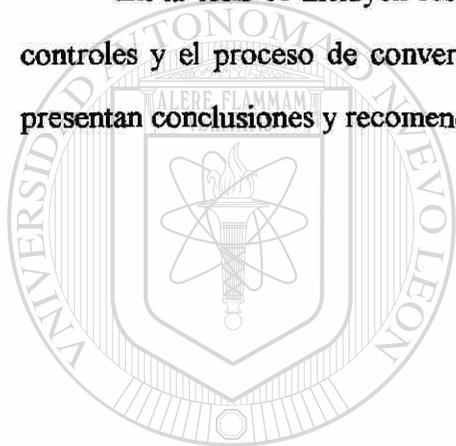
Profesor Asesor: Dr. Florencio Aboytes García

Este trabajo aborda alternativas para controlar la transmisión de la *energía eléctrica* en un sistema de potencia. Se presentan modelos de dispositivos basados en la electrónica de potencia que permiten controlar las variables que definen el flujo de potencia en una red eléctrica. Estos dispositivos son de acción rápida para controlar las variables de interés, dando mayor flexibilidad a la transmisión, con lo que se mejora la seguridad operativa del sistema de potencia. Especialmente se modela el control de la inyección de potencia reactiva mediante Compensadores Estáticos de Var's, el control del ángulo de defasamiento a través de Transformadores Defasadores y el control de la reactancia serie de líneas de transmisión mediante esquemas de Compensación Serie Controlada.

La distribución de los flujos de potencia en un sistema depende en forma importante de la localización de la carga y de su sensibilidad con las variables del sistema. Se presentan dos formas de representar cargas eléctricas en estudios de flujos de potencia, la modelación incluye la dependencia de la carga en el voltaje, la integración de los modelos al algoritmo de solución tradicional es relativamente directa.

En este trabajo la inclusión de todos los modelos en el algoritmo de flujos de potencia se realiza mediante ajustes de parámetros utilizando una lógica externa de retroalimentación. El proceso de corrección en cada iteración incluye modificaciones a las variables de control, tratando de mantener las variables dependientes en un valor especificado. Las modificaciones a las variables de control se determinan utilizando coeficientes de sensibilidad, los cuales se detallan para cada modelo.

En la tesis se incluyen resultados de simulaciones que muestran la efectividad de los controles y el proceso de convergencia obtenido en la implementación de los modelos. Se presentan conclusiones y recomendaciones en cada capítulo del trabajo.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Indice

| | |
|--------------------------------|-------|
| <i>Resumen</i> | v |
| <i>Nomenclatura</i> | xi |
| <i>Indice de Figuras</i> | xiv |
| <i>Indice de Tablas</i> | xviii |

CAPITULO 1 Introducción.

| | | |
|-----|------------------------------|---|
| 1.1 | Introducción | 1 |
| 1.2 | Objetivos de la tesis | 6 |
| 1.3 | Estructura de la tesis | 7 |

CAPITULO 2 Modelado de Cargas en estudios de flujos de potencia.

| | | |
|-------|---|----|
| 2.1 | Introducción | 9 |
| 2.2 | Modelación de carga como inyección nodal | 10 |
| 2.2.1 | Modelo de carga como potencia constante | 11 |
| 2.2.2 | Modelo de carga como corriente constante | 12 |
| 2.2.3 | Modelo de carga como impedancia constante | 12 |
| 2.2.4 | Modelos híbridos o combinados | 13 |
| 2.2.5 | Modelos de carga con dependencia de la frecuencia | 14 |
| 2.3 | Modelación de carga como equivalente Norton | 15 |
| 2.3.1 | Modelo de carga como potencia constante | 17 |
| 2.3.2 | Modelo de carga como corriente constante | 17 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.3.3 | Modelo de carga como impedancia constante | 17 |
| 2.3.4 | Modelos híbridos o combinados | 18 |
| 2.4 | Inclusión de modelos de carga en estudios de flujos de potencia | 19 |
| 2.4.1 | Inclusión del modelo de carga como Inyección nodal | 19 |
| 2.4.2 | Inclusión del modelo de carga como equivalente Norton | 21 |
| 2.5 | Sistema de prueba 1 | 22 |
| 2.6 | Sistema de prueba 2 | 27 |
| 2.7 | Conclusiones | 32 |

CAPITULO 3 Modelado de Compensadores Estáticos de Var's en estudios de flujos.

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1 | Introducción | 34 |
| 3.2 | Configuraciones típicas de CEV's | 35 |
| 3.3 | Características de operación en estado estable del CEV y la interacción con el SEP | 38 |
| 3.4 | Modelo del Compensador Estático de Var's (CEV) | 44 |
| 3.4.1 | Modelación del CEV con Característica Polarizada | 45 |
| 3.4.2 | Modelación del CEV con Característica Plana | 46 |
| 3.5 | Modelo del Compensador Estático de Var's con control remoto (CEVR) | 46 |
| 3.5.1 | Modelación del CEVR con Característica Polarizada | 47 |
| 3.5.2 | Modelación del CEVR con Característica Plana | 47 |
| 3.6 | Modelación del CEV y del CEVR fuera del rango lineal de operación ... | 48 |
| 3.7 | Inclusión del Modelo del CEV en un estudio de flujos | 49 |
| 3.8 | Inclusión del Modelo del CEVR en un estudio de flujos | 51 |
| 3.9 | Sistema de prueba 1 | 53 |

| | | |
|------|---------------------|----|
| 3.10 | Sistema de prueba 2 | 57 |
| 3.11 | Conclusiones | 61 |

CAPITULO 4 Modelado del Transformador Defasador en estudios de flujos.

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | Introducción | 63 |
| 4.2 | Análisis de la transferencia de potencia | 65 |
| 4.3 | Modelado del transformador | 66 |
| 4.4 | Inclusión del modelo del transformador defasador en flujos de potencia | 69 |
| 4.5 | Control de potencia activa en enlaces | 73 |
| 4.6 | Sistema de prueba 1 | 76 |
| 4.7 | Sistema de prueba 2 | 81 |
| 4.8 | Conclusiones | 85 |

CAPITULO 5 Modelado de Compensación Serie Controlada en estudios de flujos.

| | | |
|-------|---|----|
| 5.1 | Introducción | 87 |
| 5.2 | Análisis de la transferencia de potencia | 88 |
| 5.3 | Compensación serie fija y controlada | 89 |
| 5.4 | Métodos de Compensación Serie Controlada en estudios de flujos | 93 |
| 5.4.1 | Método de modificación de datos | 94 |
| 5.4.2 | Método de Inyecciones nodales de potencia | 95 |
| 5.5 | Inclusión del Método de Modificación de Datos en estudios de flujos de potencia | 99 |
| 5.6 | Inclusión del Método de Inyecciones nodales de potencia en estudios | |

| | | |
|------|-----------------------------|-----|
| | de flujos de potencia | 100 |
| 5.7 | Sistema de prueba 1 | 102 |
| 5.8 | Sistema de prueba 2 | 106 |
| 5.9 | Sistema de prueba 3 | 109 |
| 5.10 | Sistema de prueba 4 | 113 |
| 5.11 | Conclusiones | 115 |

CAPITULO 6 Conclusiones y Recomendaciones.

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.1 | Introducción | 117 |
| 6.2 | Conclusiones | 117 |
| 6.2.1 | Conclusiones Generales | 117 |
| 6.2.2 | Conclusiones para modelado de Cargas | 118 |
| 6.2.3 | Conclusiones para Modelado de Compensadores Estáticos de Var's | 119 |
| 6.2.4 | Conclusiones para Modelado del Transformador Defasador | 120 |
| 6.2.5 | Conclusiones para Modelado de la Compensación Serie Controlada | 121 |
| 6.3 | Aportaciones | 122 |
| 6.4 | Recomendaciones para trabajos futuros | 123 |

| | |
|--------------------------|-----|
| REFERENCIAS | 124 |
|--------------------------|-----|

APENDICE

| | | |
|----|--|-----|
| A. | Datos típicos para líneas de transmisión y transformadores utilizados en los sistemas de prueba | 129 |
|----|--|-----|

Nomenclatura:

| | |
|-------|---|
| SEP | Sistema Eléctrico de Potencia. |
| P | Potencia activa. |
| Q | Potencia reactiva. |
| S | Potencia aparente. |
| P_o | Potencia activa a voltaje nominal. |
| Q_o | Potencia reactiva a voltaje nominal. |
| V_o | Voltaje nominal. |
| U_P | Factor de participación de la potencia activa modelada como potencia constante |
| U_I | Factor de participación de la potencia activa modelada como corriente constante. |
| U_Z | Factor de participación de la potencia activa modelada como impedancia constante. |
| W_P | Factor de participación de la potencia reactiva modelada como potencia constante. |
| W_I | Factor de participación de la potencia reactiva modelada como corriente constante. |
| W_Z | Factor de participación de la potencia reactiva modelada como impedancia constante. |
| P_P | Potencia activa de carga modelada como potencia constante. |
| P_I | Potencia activa de carga modelada como corriente constante. |
| P_Z | Potencia activa de carga modelada como impedancia constante. |
| Q_P | Potencia reactiva de carga modelada como potencia constante. |

| | |
|--------------------|--|
| Q_I | Potencia reactiva de carga modelada como corriente constante. |
| Q_Z | Potencia reactiva de carga modelada como impedancia constante. |
| α y β | Parámetros del modelo exponencial. |
| K_{pf} | Factor de participación de la potencia activa que impacta en el cambio de frecuencia |
| K_{qf} | Factor de participación de la potencia reactiva que impacta en el cambio de frecuencia |
| Δf | Cambio de frecuencia. |
| G_s | Conductancia del modelo de carga como equivalente norton. |
| B_s | Susceptancia del modelo de carga como equivalente norton. |
| I | Corriente. |
| V | Voltaje. |
| G | Conductancia. |
| B | Susceptancia. |
| Y | Admitancia. |
| Y_k | Admitancia conectada al nodo k. |
| P_i^{esp} | Potencia activa especificada en el nodo i. |
| Q_i^{esp} | Potencia reactiva especificada en el nodo i. |
| CEV | Compensador Estático de Potencia Reactiva. |
| CEVR | Compensador Estático de Potencia Reactiva con control remoto de voltaje |
| X_{pte} | Reactancia Pendiente del CEV. |
| I_{CEV} | Corriente que fluye hacia el CEV. |
| Q_{CEV} | Potencia reactiva que fluye hacia el CEV. |
| ΔV | Rango aceptable de variación del voltaje. |
| V_{ref} | Voltaje de referencia. |

| | |
|--------------|---|
| ΔV_x | Señal de error de voltaje. |
| V_{nom} | Voltaje nominal. |
| V_{min} | Límite mínimo de voltaje. |
| V_{max} | Límite máximo de voltaje. |
| Q_{min} | Límite mínimo de potencia reactiva. |
| Q_{max} | Límite máximo de potencia reactiva. |
| I_{min} | Límite mínimo de corriente. |
| I_{max} | Límite máximo de corriente. |
| B_{min} | Límite mínimo de susceptancia. |
| B_{max} | Límite máximo de susceptancia. |
| KV | Kilovolts. |
| Km | Kilómetros. |
| B.V. | Bajo voltaje. |
| A.V. | Alto voltaje. |
| X_{tra} | Reactancia del transformador. |
| S_{km} | Coefficiente de sensibilidad que relaciona cambios del voltaje del nodo de carga m ante cambios de voltaje del nodo k de generación (nodo CEV). |
| V_k^{esp} | Voltaje especificado del nodo de generación k . |
| Grad | Grados. |
| Iter | Iteraciones. |
| Q_{gen} | Potencia reactiva generada. |
| N-R | Newton-Raphson |

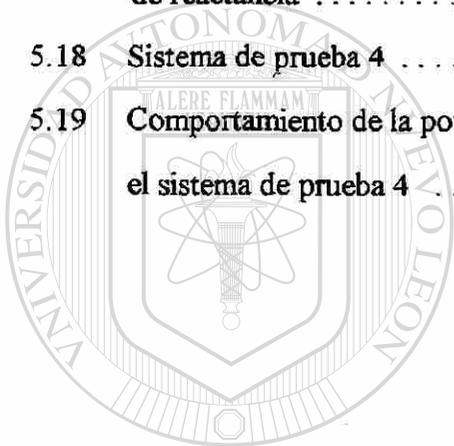
Índice de Figuras

| No. de Figura | Descripción | Página. |
|------------------|---|---------|
| 2.1 | Comportamiento de los modelos de carga. a) Potencia constante b) Corriente constante c) Impedancia constante | 13 |
| 2.2 | Representación de la carga modelada como un Equivalente Norton | 15 |
| 2.3 | Forma de implementar el modelo de carga como Equivalente Norton | 16 |
| 2.4 | Diagrama de flujo del método de N-R modificado con la inclusión de cargas como Inyección nodal | 21 |
| 2.5 | Diagrama de flujo del N-R modificado con la inclusión de cargas como Equivalentes Norton | 22 |
| 2.6 | Sistema de Prueba 1 | 22 |
| 2.7 | Representación de carga a) Inyección nodal, b) Equivalente Norton | 23 |
| 2.8 | Comparación de características P-V para diferentes modelos de carga. a) Inyección nodal, b) Equivalente Norton | 23 |
| 2.9 | Características P-V para diferentes factores de potencia | 26 |
| 2.10 | Características que muestran los problemas de convergencia | 26 |
| 2.11 | Sistema de Prueba 2 | 27 |
| 2.12 | Representación de la carga en flujos a) Inyección nodal b) Equivalente Norton | 27 |
| 2.13 | Perfiles de voltaje para el modelado de carga como Inyección nodal | 28 |
| 2.14 | Perfiles de voltaje para un incremento en la demanda del 90% | 29 |
| 2.15 | Perfiles de voltaje para modelado de carga como Equivalente Norton | 30 |
| 2.16 | Perfiles de voltaje para un incremento de demanda del 90% | 31 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.1 | Configuraciones típicas de Compensadores Estáticos de Var's | 36 |
| 3.2 | Característica V-I de un CCT para control de voltaje en una banda operativa ΔV | 37 |
| 3.3 | Característica de operación de un RCT para control de voltaje y limitador de corriente incluyendo el transformador reductor | 37 |
| 3.4 | Diagrama de bloques simplificado del sistema de control del CEV | 39 |
| 3.5 | Características de operación del CEV | 40 |
| 3.6 | Característica de operación del CEV en estado estable y sus zonas de operación | 41 |
| 3.7 | Pendiente de la característica eléctrica del sistema de potencia | 42 |
| 3.8 | Punto de operación del CEV para diferentes condiciones de operación | 43 |
| 3.9 | Representación del CEV para control de voltaje en flujos de potencia | 45 |
| 3.10 | Modelo del CEV con Característica Polarizada | 45 |
| 3.11 | Modelo del CEV con Característica Plana | 46 |
| 3.12 | Representación del CEVR para control de voltaje en flujos de potencia | 47 |
| 3.13 | Modelo del CEVR con Característica Plana | 48 |
| 3.14 | Modelado del CEV cuando opera fuera de su rango lineal de operación a) Como nodo de carga PQ, b) Como susceptancia | 49 |
| 3.15 | Modelado del CEV con lógica de control externa | 50 |
| 3.16 | Comportamiento incorrecto del CEV fuera de sus límites de reactivos | 51 |
| 3.17 | Sistema de prueba 1 con aplicación del CEV | 53 |
| 3.18 | Sistema de prueba 1 con aplicación del CEVR | 54 |
| 3.19 | Sistema de prueba 2 | 57 |
| 3.20 | Sistema de prueba 2 con la implementación del CEV | 58 |
| 4.1 | Conexión de un Transformador Defasador | 64 |
| 4.2 | Diagrama fasorial del transformador de la figura 4.1 | 64 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.3 | Aplicación del Transformador Defasador en la línea de transmisión | 65 |
| 4.4 | Diagrama unifilar del transformador con admitancia en el lado de baja | 66 |
| 4.5 | Diagrama de flujo de N-R modificado con la implementación del transformador defasador | 72 |
| 4.6 | Sistema de prueba elemental | 73 |
| 4.7 | Distribución del flujo de potencia activa para $\phi = 0^\circ$ | 77 |
| 4.8 | Distribución del flujo de potencia activa para $\phi = 10^\circ$ | 78 |
| 4.9 | Distribución del flujo de potencia activa para $\phi = -10^\circ$ | 78 |
| 4.10 | Comportamiento de la potencia activa al variar el defasamiento | 79 |
| 4.11 | Convergencia para controlar el flujo de potencia activa a un valor especificado | 80 |
| 4.12 | Sistema de prueba 2 | 81 |
| 4.13 | Comportamiento de la potencia activa en la línea 2-3 debido al efecto del defasamiento | 83 |
| 5.1 | Sistema eléctrico de potencia | 88 |
| 5.2 | Compensación serie en la línea de transmisión | 89 |
| 5.3 | Compensación en enlaces de transmisión | 90 |
| 5.4 | Esquema de compensación serie | 91 |
| 5.5 | Esquema de compensación serie controlada | 92 |
| 5.6 | Esquema alternativo de compensación serie controlada | 93 |
| 5.7 | Inyecciones nodales de potencia para simular los cambios de reactancia | 95 |
| 5.8 | Sistema básico para analizar el efecto del cambio de reactancia | 97 |
| 5.9 | Diagrama de flujo de N-R modificado con la inclusión del modelo de la compensación serie controlada | 101 |
| 5.10 | Sistema de prueba 1 | 102 |
| 5.11 | Efecto en la potencia activa del cambio de reactancia | 103 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.12 | Convergencia del algoritmo para controlar la potencia a un valor específico | 105 |
| 5.13 | Sistema de prueba 2 | 106 |
| 5.14 | Comportamiento de la potencia activa por efecto de la compensación | 107 |
| 5.15 | Impacto del porcentaje de compensación sobre la potencia activa para diferentes longitudes de línea | 109 |
| 5.16 | Sistema de prueba 3 | 110 |
| 5.17 | Comportamiento de la potencia activa en la línea 2-3 ante cambios de reactancia | 111 |
| 5.18 | Sistema de prueba 4 | 113 |
| 5.19 | Comportamiento de la potencia activa ante cambios de reactancia para el sistema de prueba 4 | 114 |



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Índice de Tablas

| No. de Tabla | Descripción | Página. |
|-----------------|---|---------|
| 2.1 | Resultados del modelado de carga como impedancia constante | 24 |
| 2.2 | Resultados del modelado de carga como corriente constante | 25 |
| 2.3 | Resultados del modelado de carga como potencia constante | 25 |
| 2.4 | Resultados del caso base para el modelado de carga como inyección nodal | 28 |
| 2.5 | Resultados para un incremento de demanda del 90% | 29 |
| 2.6 | Resultados del caso base para el modelado de carga como equivalente Norton .. | 30 |
| 2.7 | Resultados para un incrementos de demanda del 90% | 31 |
| 3.1 | Resultados de simulaciones en el sistema de prueba 1 con la aplicación de CEV's | 53 |
| 3.2 | Resultados de simulaciones en el sistema de prueba 1 con la aplicación de CEVR | 54 |
| 3.3 | Resultados de simulación completa aplicando CEV's para $X_{pte} = 0.03$ | 56 |
| 3.4 | Resultados de simulación completa aplicando CEVR para $X_{pte} = 0.03$ | 56 |
| 3.5 | Resultados de las simulaciones del sistema de prueba 2 | 58 |
| 3.6 | Resultados del control remoto de voltaje con la aplicación de CEV's al sistema de prueba 2 | 59 |
| 3.7 | Resultados de las simulaciones al violar uno de los límites del CEV o del CEVR | 60 |
| 4.1 | Resultados del efecto del transformador defasador en la línea 1-2 sobre la potencia activa para el sistema de prueba 1 | 77 |
| 4.2 | Resultados del control de flujo a valores preestablecidos en enlaces | 80 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 4.3 | Resultados del efecto del transformador defasador en la línea 2-3 sobre la potencia activa para el sistema de prueba 2 | 82 |
| 4.4 | Resultados para control de potencia activa en forma local CASO 1 | 84 |
| 4.5 | Resultados para control de potencia activa en forma remota CASO 2 | 85 |
| 5.1 | Resultados del efecto de la compensación serie sobre la potencia activa | 103 |
| 5.2 | Resultados del control de potencia activa a valores preestablecidos | 104 |
| 5.3 | Resultados del efecto de la compensación serie controlada sobre la potencia activa para el sistema de prueba 2 | 106 |
| 5.4 | Resultados del control de potencia activa a valores preestablecidos | 108 |
| 5.5 | Resultados de la potencia activa ante los cambios de reactancia en la línea 2-3 .. | 110 |
| 5.6 | Resultados del control local de potencia activa a valores preestablecidos en la línea 2-3 | 112 |
| 5.7 | Resultados del control remoto de potencia activa a valores preestablecidos para el sistema de prueba 3 | 112 |
| 5.8 | Resultados del efecto de la compensación serie controlada sobre la potencia activa en el sistema de prueba 4 | 114 |
| 5.9 | Resultados del control de potencia activa a valores preestablecidos en el sistema de prueba 4 | 115 |

Capítulo 1

INTRODUCCION

1.1 INTRODUCCION.

Hasta hace algunos años, los sistemas eléctricos de potencia eran de configuraciones simples y estaban diseñados para ser autosuficientes, la exportación e importación de energía eléctrica no era frecuente y se consideraba que los sistemas de transmisión de corriente alterna no se podían controlar lo suficientemente rápido para mejorar las condiciones dinámicas del sistema.

En la planeación y expansión de los sistemas eléctricos de potencia tradicionalmente se incluye algún tipo de compensación, compensación serie o en derivación, la cual puede ser fija o desconectable por medios mecánicos. El objetivo principal de la compensación es minimizar las variaciones de voltaje o bien controlar el flujo de potencia bajo condiciones de estado estable o cambios lentos de carga. Los problemas dinámicos del sistema normalmente se manejaban con la conexión/desconexión de varios equipos y/o elementos para controlar variables dinámicas, y de esa forma tener márgenes amplios y asegurar una recuperación exitosa de la estabilidad del sistema, ocasionada por salidas de generadores y líneas, así como de fallas en equipos. El resultado es generalmente una subutilización del sistema de transmisión [44].

En la actualidad, con la evolución y el crecimiento de la industria y el crecimiento demográfico, se demanda más energía eléctrica; esto trae consigo requerimientos adicionales en la generación y transmisión de energía. Para abastecer de energía eléctrica a un país se requiere de grandes inversiones en el sector eléctrico, siendo necesario evaluar los recursos disponibles, por otro lado, los centros de generación generalmente no están cerca de los centros de consumo, por lo que es necesario transmitir energía a grandes distancias o importar energía de otros países. Lo cual ha propiciado también una mayor complejidad en la operación de los sistemas eléctricos. En todo este proceso, el sistema de transmisión juega un papel muy importante en la confiabilidad del servicio, debiendo ser identificadas las restricciones de transmisión y supervisados continuamente los límites operativos de seguridad [7, 30, 45, 48].

Algunas de las dificultades más importantes para la construcción de nuevas líneas de transmisión aéreas están relacionadas con aspectos económicos, la disponibilidad de espacios, el impacto en el medio ambiente y disposiciones legales, dando lugar a problemas operativos importantes que pueden conducir a condiciones de colapso en los sistemas eléctricos de potencia. Esta situación ha forzado a una revisión de las prácticas y conceptos básicos de los sistemas de potencia para lograr una mayor flexibilidad en la operación y una mejor utilización de los sistemas existentes.

En los últimos años se han dado avances tecnológicos importantes en el control de semiconductores de alta potencia, mediante los cuales es posible dirigir en forma controlada el flujo de potencia en una red eléctrica, resultando un sistema de transmisión flexible que se adapta a los cambios que ocurren en el sistema o a las estrategias de control que se deseen implementar desde los centros de control [43, 44].

El flujo de potencia en una línea de transmisión es función de las magnitudes de los voltajes en los nodos extremos, de la diferencia de ángulos de fase de los voltajes nodales y de la reactancia de la línea. Con el diseño de equipos basados en la electrónica de potencia, apoyadas por técnicas de control adecuadas se puede tener una gran rapidez (1/2 ciclo) en el cambio de cada una de las variables que definen el flujo de potencia. El uso de tiristores con alta capacidad ha sido muy importante para mejorar la transmisión, pero sobre todo, para realizar la conexión/desconexión de elementos, sin esfuerzos o pérdida de vida en componentes. Generalmente la conexión o desconexión de capacitores se realiza en forma discreta, mientras que la conexión de reactores es controlada y continua mediante el control del ángulo de disparo de tiristores [12, 13, 36].

Los problemas típicos en un sistema de potencia cuando no se dispone de controles rápidos y confiables [36] son:

- Problemas de estabilidad.
- Flujo de potencia por trayectorias no deseadas.
- Inhabilidad para utilizar la capacidad de los conductores
- Flujos no deseados de potencia reactiva.
- Voltajes nodales fuera de márgenes operativos.
- Disparos en cascada de elementos y tiempos largos de restauración.

A su vez, en los últimos años se han presentado acontecimientos que han incrementado la incertidumbre en la planificación de los sistemas de potencia; entre ellos:

- La creciente oposición a la instalación de líneas de transmisión aéreas, sobre todo en grandes ciudades.
- La participación creciente de la cogeneración en la producción de energía.

- Las tendencias en algunos países de cambiar la organización de las Empresas Eléctricas Nacionales por compañías privadas para la generación y transmisión de energía.
- El nuevo clima regulatorio/político en la industria eléctrica.

Todo esto obliga a diseñar sistemas de transmisión más eficientes utilizando dispositivos adecuados que permitan la explotación plena de su capacidad, cargas extras sin sacrificio de la confiabilidad, además de reducir las pérdidas de transmisión [45].

Las variables que definen el flujo de potencia pueden ser controladas por diversos equipos basados en la electrónica de potencia; para controlar la magnitud de voltaje se utilizan los Compensadores Estáticos de Var's (CEV'S), para el control del ángulo de fase se emplean los Transformadores Defasadores (TD) y para controlar la reactancia serie de la línea se utilizan los esquemas de Compensación Serie Controlada (CSC).

N. G. Hingorani [43] propuso el concepto de sistemas de transmisión flexible o FACTS, que incluye el uso de la electrónica de potencia, centros de control avanzados y enlaces de comunicación para incrementar la capacidad de los sistemas de transmisión a su límite térmico.

El desarrollo de la compensación estática reactiva tuvo su inicio con el esquema del reactor saturado, aplicado principalmente al control de voltaje en cargas industriales. En 1964 se reporta la primera aplicación al control de fluctuaciones de voltaje en un horno de arco en Africa. La primera aplicación en niveles de transmisión se realiza en Inglaterra en 1967 como soporte de voltaje en el punto de unión de la red de 400 KV con la red de 132 KV. Asimismo, en 1969 se conoce la instalación de compensación múltiple en el sistema de transmisión mediante reactores saturados a un nivel de 132 KV [50].

La introducción de los tiristores en los sistemas de potencia se presentó a nivel industrial en la década de los 70's, en 1977 se reporta en los Estados Unidos la primera aplicación de un CEV para control de voltaje en sistemas de transmisión. En la subestación Victory Hill en Nebraska se instala un Reactor Controlado por Tiristores (RCT) con el propósito de controlar variaciones de voltaje, tanto en condiciones de estado estable como ante contingencias.

Con el avance tecnológico, las ventajas técnicas de los CEV'S del tipo Capacitor Controlado por Tiristores (CCT) y RCT son combinados surgiendo el esquema mixto de compensación CCT/RCT. La primera aplicación de un CEV de este tipo se logra en 1979, en el sistema ESCOM en Sudáfrica, para la corrección de desbalances de voltaje en 132 KV causadas por cargas asimétricas de trenes [43, 50].

En la actualidad los CEV'S se han convertido en un medio efectivo de control de voltaje y potencia reactiva en los sistemas de potencia, sobre todo para controlar el voltaje en sistemas longitudinales. Son utilizados en una gran cantidad de aplicaciones, entre ellas se puede mencionar: la reducción de fluctuaciones de voltaje causados por cargas con comportamiento irregular, el aumento en la capacidad estática y dinámica en la transferencia de potencia, el mejoramiento de la estabilidad dinámica de los SEP'S, el control del voltaje en estado estable y transitorio, y el mejoramiento de la eficiencia de transmisión y factor de potencia [16].

La primera aplicación de la Compensación Serie Controlada por medio de tiristores fue para incrementar la potencia transmitida. En 1991 en la subestación Kanawha River al oeste de Virginia (EUA) se prueba el switcheo de un banco de capacitores serie sobre una fase de la línea de transmisión de 345 KV [43].

En octubre de 1992 se da la primera aplicación de Compensación Serie Controlada trifásica en la subestación Kayenta en Arizona, en una línea de 300 Km, un nivel de voltaje de 230 KV y transmitiendo una potencia de 300 MW. La instalación incluye tres segmentos de reactancia que dan un incremento en la capacidad de transmisión de 300 MW a 400 MW [43].

1.2 OBJETIVOS DE LA TESIS.

Para evaluar la efectividad de los equipos y controles descritos anteriormente, se requiere modelarlos en forma adecuada en los diferentes estudios que se realizan en la planeación y operación de los Sistemas Eléctricos de Potencia. Con estas ideas se desarrolló el presente trabajo, con los siguientes objetivos:

- Modelar y analizar en estado estable el comportamiento de las cargas eléctricas en un sistema de potencia mediante modelos en función del voltaje.
- Modelar y evaluar el comportamiento en estado estable de compensadores estáticos de var's para el control del voltaje en el sistema.
- Modelar y analizar el comportamiento en estado estable de transformadores defasadores y esquemas de compensación serie controlada para el control de potencia activa en el sistema de transmisión.

1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS.

Esta tesis está estructurada en seis capítulos. En el capítulo 1 se presenta la introducción general, antecedentes más importantes y los objetivos principales del presente trabajo.

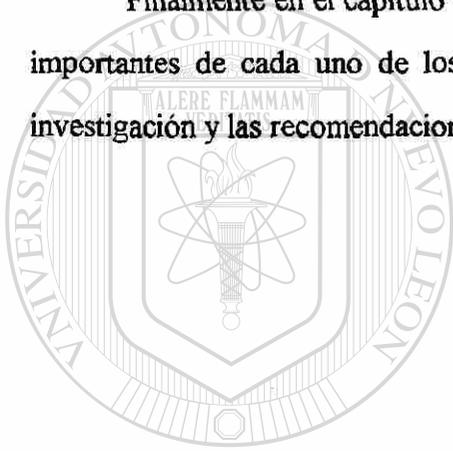
En el capítulo 2 se presentan dos formas de modelar las cargas eléctricas en un estudio de flujos de potencia. Se detalla a su vez la forma de implementarlos en el método de Newton-Raphson. Ambos modelos son implementados utilizando la forma polinomial y la exponencial. Se analizan los modelos implementados en sistemas de prueba, presentando resultados y conclusiones.

En el capítulo 3 se presentan los tipos y características de operación de los compensadores estáticos de var's en estado estable. Se analizan dos formas de modelar la compensación estática reactiva en flujos de potencia, mediante el modelo del Compensador Estático de Var's (CEV) y el modelo del Compensador Estático de Var's con control Remoto (CEVR); ambos considerando características planas o polarizadas de control. Se analizan dos formas de modelar el CEV y el CEVR cuando se viola alguno de sus límites de reactivos. Se incluyen resultados y conclusiones de simulaciones en sistemas de prueba.

En el capítulo 4 se presenta en detalle el modelado del transformador defasador en un estudio de flujos de potencia y su impacto en el control de potencia activa transmitida, tanto en forma local como remota. Se detalla la forma de incluirlo en el algoritmo de flujos de potencia, se analiza el comportamiento de la potencia activa ante los cambios del ángulo de defasamiento. La implementación de los modelos se analiza mediante sistemas de prueba presentando resultados y conclusiones.

En el capítulo 5 se presentan los conceptos básicos de la compensación serie capacitiva y su impacto en el flujo de potencia. Se presentan esquemas de compensación serie fija y/o controlada. Se detallan los métodos para el modelado de la Compensación Serie Controlada (CSC) y la forma de implementarlos en estudios de flujos de potencia. Se analiza el impacto de la CSC sobre el flujo de potencia transmitido mediante sistemas de prueba, presentando resultados y conclusiones.

Finalmente en el capítulo 6 se presentan conclusiones generales y las conclusiones más importantes de cada uno de los modelos implementados, las aportaciones de la presente investigación y las recomendaciones para trabajos futuros relacionados con el tema.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Capítulo 2

MODELADO DE CARGAS EN ESTUDIOS DE FLUJOS DE POTENCIA

2.1 INTRODUCCION.

En un sistema eléctrico de potencia debe existir en forma continua un equilibrio entre la generación y la carga eléctrica, de esta forma se tendrá una operación estable. En el sistema se tiene una gran diversidad de cargas eléctricas, las cuales se conectan y desconectan en forma continua, lo que hace necesario un modelado adecuado para mejorar las respuestas de los diferentes estudios que se realizan, tanto estudios del comportamiento en estado estable como estudios de estabilidad transitoria y dinámica [1, 6].

El modelado de cargas eléctricas para un estudio detallado es complicado, principalmente por el gran número de equipos involucrados tales como; lámparas incandescentes y fluorescentes, refrigeradores, calentadores, hornos, motores, etc., generalmente es difícil estimar la composición exacta de la carga. La composición de la carga depende de condiciones atmosféricas, niveles geográficos, factores socioeconómicos y de variaciones entre días y horas [6, 8].

En este capítulo se presentan dos formas de modelación de cargas eléctricas en función del voltaje en los estudios de flujos de potencia; la primera como Inyección nodal que consiste en modificar únicamente el vector de inyecciones nodales de potencia, y la segunda como equivalentes Norton con una parte pasiva que se incluye en la matriz de admitancias del sistema y una parte activa que se incluye en el vector de inyecciones nodales de potencia; de tal forma que con ambas modelaciones se logren representar los modelos clásicos de carga como potencia constante, corriente constante e impedancia constante o una combinación.

2.2 MODELACION DE CARGA COMO INYECCION NODAL.

Un modelo de carga pasivo en función del voltaje es representado por funciones algebraicas en función de la variación de la magnitud del voltaje y la frecuencia en un instante de tiempo dado, sin embargo, la variación de frecuencia es pequeña, en tanto que la mayor variación generalmente se observa con la magnitud del voltaje, sobre todo en sistemas débiles, se acostumbra incluir sólo éste efecto en estudios de estado estable y estabilidad transitoria [1, 2, 3, 4]. La componente de potencia activa (P) y potencia reactiva (Q) son consideradas en forma separada.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Un estudio de flujos de potencia tradicional se formula considerando que las cargas permanecen constantes y que son independientes de las variaciones del voltaje. Cuando se quiere hacer una representación más realista se utiliza el modelo exponencial dependiente de la magnitud del voltaje de la barra, de la forma siguiente:

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (2.1)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (2.2)$$

donde :

- V_0 Voltaje nominal.
- P_0 Potencia activa a voltaje nominal.
- Q_0 Potencia reactiva a voltaje nominal.

Esta forma de modelación de carga es la más simple y fácil de implementar, las tres opciones clásicas para representar la carga [6, 8], si los exponentes α y β toman un valor de 0, 1 o 2, son:

- Potencia constante.
- Corriente constante.
- Impedancia constante.

2.2.1 Modelo de carga como potencia constante.

Las cargas que se modelan como potencia constante mantienen una inyección de potencia invariable e independiente del voltaje de la barra, lo que origina inyecciones de corriente con dependencia lineal inversa. Este comportamiento da lugar a que durante una falla cuando la caída de voltaje es grande y la corriente pueda llegar a valores altos, lo que contribuirá a una caída de voltaje mayor provocando una tendencia al colapso de voltaje y a un problema de convergencia en el algoritmo de flujos de potencia [5, 8, 51].

El modelo de carga como potencia constante se representa a partir del modelo exponencial de acuerdo con (2.1) y (2.2), si α y β toman un valor igual a cero ($\alpha = \beta = 0$), esto es :

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^0 = P_0 \quad (2.3)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^0 = Q_0 \quad (2.4)$$

2.2.2 Modelo de carga como corriente constante.

Las cargas modeladas como corriente constante mantienen una inyección de potencia linealmente dependiente del voltaje. Para este modelo se define que la magnitud de la corriente permanece constante, lo mismo que el factor de potencia [1, 2, 3, 8], el valor de los parámetros α y β son iguales a uno ($\alpha = \beta = 1$) por lo tanto, de (2.1) y (2.2) se obtiene la variación lineal en el voltaje.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right) \quad (2.5)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right) \quad (2.6)$$

2.2.3 Modelo de carga como impedancia constante.

Para este modelo las inyecciones de potencia tienen una dependencia cuadrática en la magnitud del voltaje de la barra, en muchos estudios se considera que las cargas se comportan como impedancias constantes durante el proceso transitorio, las razones son simplicidad en la representación y en la simulación, y la no disponibilidad de información sobre el comportamiento real [6, 8]; en este caso los parámetros α y β son iguales a dos ($\alpha = \beta = 2$) de acuerdo con (2.1) y (2.2).

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \quad (2.7)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \quad (2.8)$$

En forma gráfica se muestra el comportamiento de cada uno de los modelos de carga en la Figura 2.1.

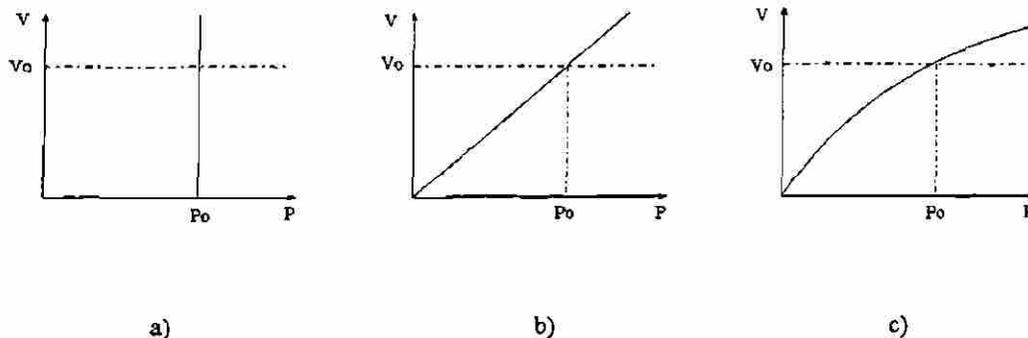


Fig. 2.1 Comportamiento de los modelos de carga.

a) Potencia Constante, b) Corriente Constante, c) Impedancia Constante.

2.2.4 Modelos híbridos o combinados.

En los sistemas reales las carga equivalentes conectadas a las subestaciones son una combinación de diferentes tipos, con una dependencia del voltaje que puede ser muy diferente a las cargas clásicas, como potencia constante, corriente constante o impedancia constante. De tal forma que se pueden usar dos alternativas para representar cargas con efectos combinados [6, 8], estas son:

- i).- La forma polinomial.
- ii).- La forma exponencial.

La modelación polinomial representa la potencia activa y reactiva de la carga en función de la magnitud del voltaje precisamente como una ecuación polinomial de la forma siguiente :

$$P = P_0 \left(U_Z \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + U_I \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 + U_P \right) \quad (2.9)$$

$$Q = Q_0 \left(W_Z \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + W_I \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 + W_P \right) \quad (2.10)$$

Este modelo algunas veces es llamado modelo "ZIP" por el hecho de que está presente la combinación de los modelos de impedancia constante, corriente constante y potencia constante. Las constantes: U_Z , U_I , U_P son los factores de participación de los modelos clásicos en la potencia activa de la carga, similarmente las constantes W_Z , W_I , W_P son los factores de participación en la potencia reactiva de la carga.

La única restricción es que la suma de los factores de participación de cada modelo de carga deben ser la unidad, esto es :

$$\begin{aligned} U_P + U_I + U_Z &= 1.0 \\ W_P + W_I + W_Z &= 1.0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

En la modelación en forma exponencial lo que se desea es determinar el valor exacto de los parámetros α y β en (2.1) y (2.2), esto se logra con la aplicación de algunas propiedades de los logaritmos [8].

2.2.5 Modelos de carga con dependencia de la frecuencia.

Las industrias con gran demanda pueden ser modeladas en detalle ya que pueden influir de manera significativa en la dinámica del sistema, una representación más completa deberá incluir la dependencia de las cargas con la frecuencia, en donde las funciones polinomiales o exponenciales deberán de incluir términos adicionales en función de la frecuencia [1, 2, 36].

Una representación polinomial y exponencial dependiente de la frecuencia es la siguiente :

Forma exponencial.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha (1 + K_{pf} \Delta f) \quad (2.12)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta (1 + K_{qf} \Delta f) \quad (2.13)$$

Forma polinomial.

$$P = P_0 \left(U_Z \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + U_I \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 + U_P \right) (1 + K_{pf} \Delta f) \quad (2.14)$$

$$Q = Q_0 \left(W_Z \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + W_I \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 + W_P \right) (1 + K_{qf} \Delta f) \quad (2.15)$$

Donde Δf es el cambio de frecuencia ($f - f_0$), el coeficiente de participación de la potencia activa que impacta en el cambio de frecuencia K_{pf} típicamente toma valores en el rango de 0 a 3, en tanto que el coeficiente de participación de la potencia reactiva que impacta en el cambio de frecuencia K_{qf} toma valores entre -2 y 0 [36].

2.3 MODELACION DE CARGA COMO EQUIVALENTE NORTON.

Esta modelación de carga consiste en representar la carga del sistema con un Equivalente Norton, en la Figura 2.2 se indica ésta representación.

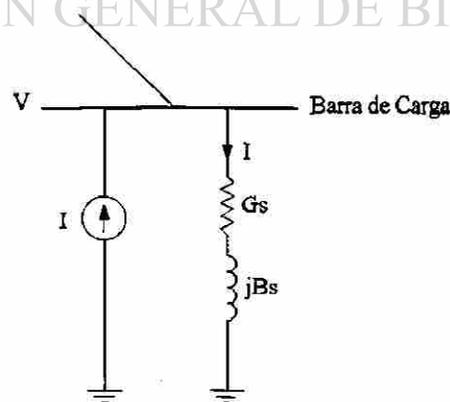


Fig. 2.2 Representación de la carga modelada como un Equivalente Norton.

En este modelo es necesario determinar los valores de G_s y B_s a partir de los valores especificados de potencia activa y reactiva. De la Figura 2.2 la corriente en la parte pasiva es:

$$\mathbf{I} = \mathbf{y} \mathbf{V} \quad (2.16)$$

y la potencia
$$\mathbf{S} = \mathbf{V} \mathbf{I}^* = \mathbf{P} + \mathbf{jQ} \quad (2.17)$$

sustituyendo (2.16) en (2.17), se tiene:

$$\mathbf{P} + \mathbf{jQ} = |\mathbf{V}|^2 \mathbf{y}^* \quad (2.18)$$

sustituyendo $\mathbf{y} = G_s + \mathbf{j}B_s$ en (2.18) y separando parte real e imaginaria, resulta:

$$G_s = \frac{P_0}{|\mathbf{V}|^2} \quad (2.19)$$

$$B_s = -\frac{Q_0}{|\mathbf{V}|^2}$$

Utilizando los Equivalentes Norton también es posible representar los modelos de potencia constante, corriente constante e impedancia constante o la combinación.

Al tener incluida la admitancia del equivalente pasivo en la matriz de admitancias, se debe determinar la diferencia entre la potencia de la carga al voltaje nominal y la potencia demandada con el voltaje calculado, la cual será inyectada en el vector independiente, esto se

debe de realizar en cada iteración de tal forma que se logre representar el modelo de carga deseado; en la Figura 2.3 se puede apreciar la forma implementada.

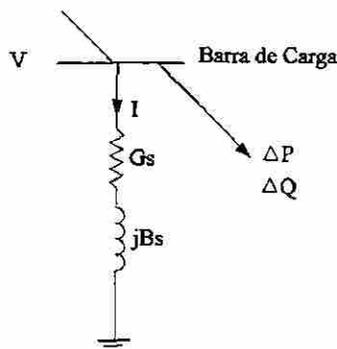


Fig. 2.3 Forma de implementar el modelo de carga como equivalente Norton.

2.3.1 Modelo de carga como potencia constante.

Para obtener un modelo de carga como potencia constante, la inyección de potencia en el vector independiente es la diferencia entre la potencia del modelo de carga como potencia constante y la potencia demandada por el elemento en derivación incluido en la matriz de admitancias, la cual varía en forma cuadrática con la magnitud del voltaje de la barra.

$$\Delta P = P_0 - P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \quad (2.20)$$

$$\Delta Q = Q_0 - Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \quad (2.21)$$

2.3.2 Modelo de carga como corriente constante.

En este modelo la inyección de potencia depende de la diferencia entre la potencia del modelo como corriente constante que varía linealmente con el voltaje y la potencia demandada en el elemento en derivación incluido en la matriz de admitancias que varía cuadráticamente con el voltaje de la barra.

$$\Delta P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 - P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \quad (2.22)$$

$$\Delta Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 - Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \quad (2.23)$$

2.3.3 Modelo de carga como impedancia constante.

Para este modelo de carga no es necesario hacer ningún ajuste en el vector de inyecciones de potencia, debido a que la diferencia de potencias entre la potencia de la carga modelada como impedancia constante y la potencia demandada por el elemento en derivación incluido en la matriz de admitancias es igual a cero.

$$\Delta P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 - P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 = 0 \quad (2.24)$$

$$\Delta Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 - Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 = 0 \quad (2.25)$$

2.3.4 Modelos híbridos o combinados.

Generalmente las cargas se representan combinando los modelos de carga como potencia constante, corriente constante e impedancia constante, en porcentajes tales que reproduzcan de una forma más real el comportamiento de las cargas equivalentes en las subestaciones, en particular de aquellas cargas situadas en puntos del sistema donde las variaciones de voltaje son más severas.

Si se utiliza la forma polinomial, la inyección de potencia es la diferencia en forma general para diferentes porcentajes de participación de cada modelo de carga y considerando las características de respuesta con respecto al voltaje y la potencia demandada por el elemento en derivación que varía en forma cuadrática respecto al voltaje de la barra.

$$\Delta P = P_0 \left(U_P + U_I \left(\frac{V}{V_0} \right) + U_Z \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right) - P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \quad (2.26)$$

$$\Delta Q = Q_0 \left(W_P + W_I \left(\frac{V}{V_0} \right) + W_Z \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right) - Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \quad (2.27)$$

La otra forma de representar los modelos combinados es mediante la forma exponencial, usando (2.1) y (2.2). Donde se desea conocer en forma exacta los valores de α y β , lo cual se logra usando propiedades de los logaritmos [8].

2.4 INCLUSION DE MODELOS DE CARGA EN ESTUDIOS DE FLUJOS DE POTENCIA.

Como se ha presentado en las secciones anteriores la potencia activa y reactiva de las cargas están en función del voltaje y la frecuencia, sin embargo, las variaciones de frecuencia en estado estable son pequeñas por lo que normalmente se desprecian en los modelos implementados, únicamente se consideran las variaciones de voltaje.

Cualquier modificación o cambio que se realice en un programa de flujos de potencia convencional, es de esperarse que se realicen más iteraciones o que se tengan problemas de convergencia, por ese motivo se seleccionó el método de Newton-Raphson formal [19, 25, 26, 27, 28, 46] para la inclusión de los modelos de carga, considerando las características de robustez y confiabilidad del método [51].

2.4.1 Inclusión del Modelo de Carga como Inyección Nodal.

En la formulación del estudio de flujos de potencia convencional, usando el Método de Newton-Raphson formal, se puede incluir el efecto de las cargas sensibles a las variaciones de voltaje, modificando únicamente el vector de inyecciones de potencia. El sistema de ecuaciones a resolver es:

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = (J) \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V / V \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

donde:

- $\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix}$ Vector independiente o de incrementos de inyecciones de potencia.
- (J) Matriz Jacobiana.
- $\begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V / V \end{pmatrix}$ Vector de variables dependientes o de estado.

El vector de incrementos de potencia activa y reactiva se forma de acuerdo con la diferencia entre potencias especificadas y calculadas, esto es :

$$\begin{pmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_i^{esp} - P_i^{cal} \\ Q_i^{esp} - Q_i^{cal} \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

En el programa convencional de flujos [19, 25, 26, 27, 28, 46] de potencia los valores de P_i^{esp} y Q_i^{esp} son constantes, el efecto del modelado de carga en función del voltaje es incluido en éste término, lo que indica que ahora no será constante, sino que cambiará de acuerdo con el voltaje de la barra, según (2.30).

$$\begin{aligned} P_i^{esp} &= P_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^\alpha \\ Q_i^{esp} &= Q_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^\beta \end{aligned} \quad (2.30)$$

La implementación de este modelo de carga en función del voltaje es general, o sea, permite el modelado de carga de cada uno de los modelos de carga clásicos: potencia constante, corriente constante e impedancia constante o la combinación; tanto en forma polinomial como en forma exponencial.

El algoritmo de flujos de potencia se ve modificado con el efecto de las cargas en función del voltaje como se muestra en la Figura 2.4, la solución consiste en que antes de cada iteración se calculan los valores de las inyecciones de potencia activa y reactiva en los nodos de carga de acuerdo con la variación del voltaje, y se modifica el vector de términos independientes y así, en cada iteración hasta obtener convergencia [1, 6].

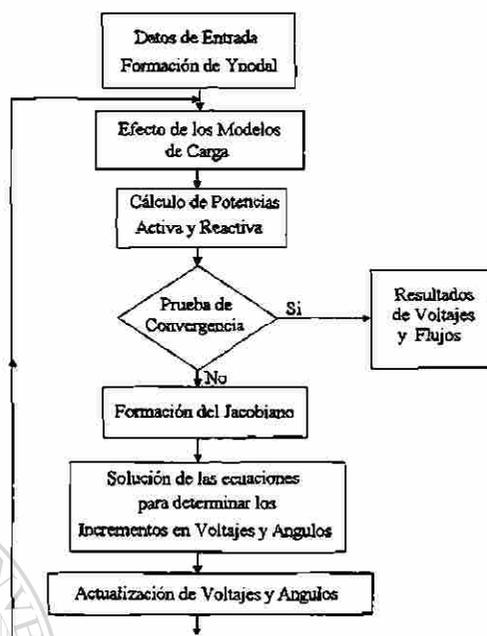


Fig. 2.4 Diagrama de flujo del Método de N-R modificado con la inclusión de cargas como Inyección nodal.

2.4.2 Inclusión del Modelo de Carga como Equivalente Norton.

Para la implementación de este modelo de carga en estudios de flujos de potencia primeramente se debe incluir la admitancia de la carga en la matriz de admitancias del sistema antes del proceso iterativo, posteriormente se determina la inyección de potencia activa y reactiva necesaria, de acuerdo al modelo de carga que se quiera representar, la cual será inyectada en el vector de términos independientes de (2.28). Con este procedimiento se pueden representar modelos de carga clásicos o la combinación de ellos, tanto en forma exponencial como polinomial.

En la Figura 2.5 se presenta un diagrama de flujo del método de Newton-Raphson modificado con la inclusión de cargas modeladas como Equivalentes Norton.

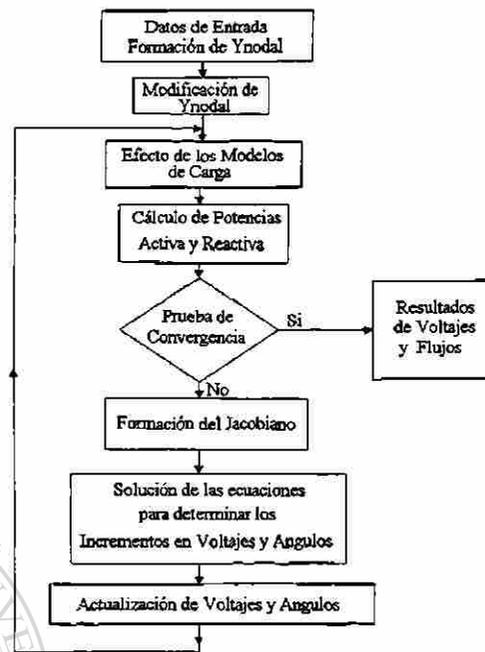


Fig. 2.5 Diagrama de flujo de N-R Modificado con la inclusión de Cargas como Equivalentes Norton.

2.5 SISTEMA DE PRUEBA 1.

Un sistema de prueba se puede presentar mediante una gran cantidad de variantes, en donde se puede observar el comportamiento de los modelos de carga, sin embargo, un sistema equivalente simple se ilustra en la Figura 2.6, los datos para la línea de interconexión son datos típicos (ver Apéndice para datos).

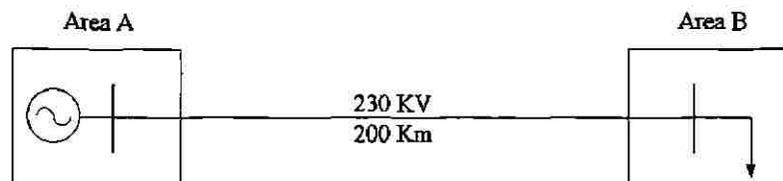


Fig. 2.6 Sistema de Prueba 1.

El Area A es una área exportadora donde se tiene la fuente de reactivos. El Area B es una área de consumo. Cualquier cambio en la demanda tendrá que ser suministrado por el Area A a través de la línea de transmisión.

En la Figura 2.7 se presenta la carga para el sistema de prueba 1 para ambas implementaciones. En la Figura 2.8 se muestran las curvas P-V, que determinan el comportamiento de los modelos de carga como potencia constante, corriente constante e impedancia constante.

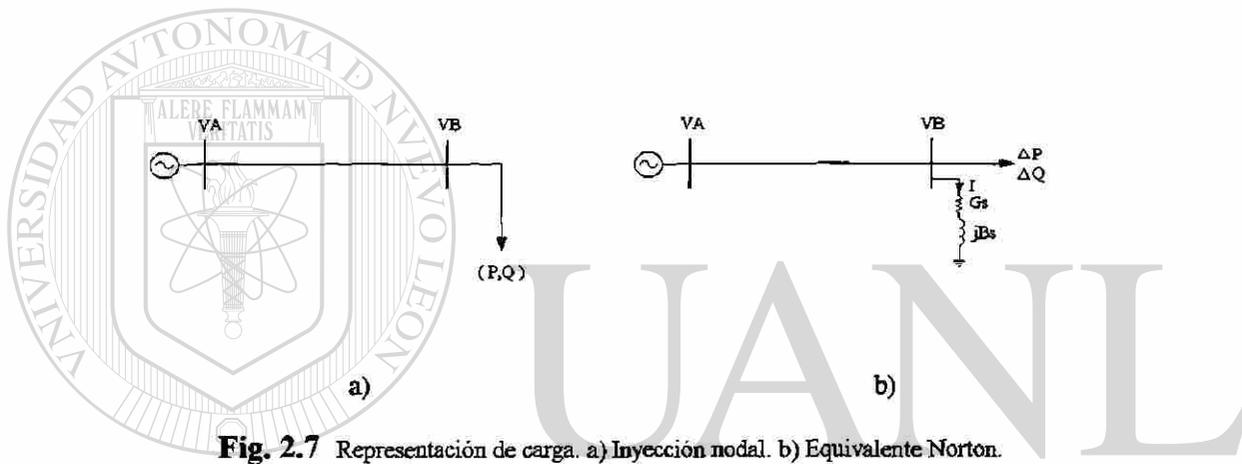


Fig. 2.7 Representación de carga. a) Inyección nodal. b) Equivalente Norton.

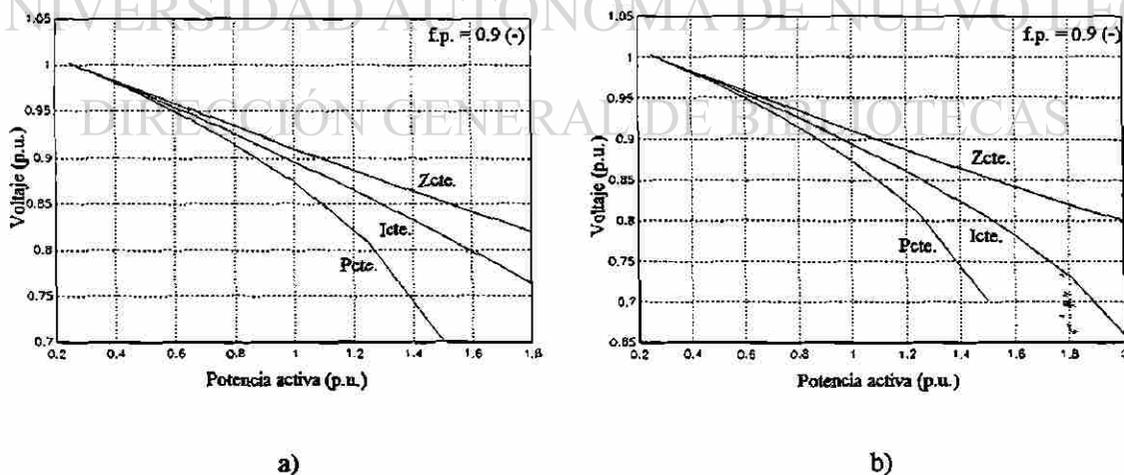


Fig. 2.8 Comparación de características P-V para diferentes modelos de carga.

a) Inyección nodal, b) Equivalente Norton.

Las curvas fueron obtenidas realizando corridas de flujos para diferentes valores de potencia activa demandada, con un mismo factor de potencia y un voltaje de generación especificado. El comportamiento de las características de la Figura 2.8 muestran que a medida que se incrementa la demanda, el voltaje en el nodo de carga se deprime, se puede observar también que esta variación es no-lineal, especialmente en el modelo de potencia constante.

El programa de flujos de potencia permite obtener la parte superior de la característica P-V, para valores de potencia de carga mayores a los presentados en la Figura 2.8, se tuvieron problemas de convergencia.

En las Tablas 2.1 a 2.3 se presentan resultados para diversos modelos de carga (impedancia constante, corriente constante y potencia constante respectivamente). Para los dos métodos de implementación utilizados los resultados de voltajes y potencias finales son aproximadamente iguales, excepto en el número de iteraciones. Los resultados son para un factor de potencia de 0.9 (-), y con una tolerancia de 1 MW. M1 se refiere al modelo como inyección de potencia nodal y M2 al modelo como equivalente Norton.

Tabla 2.1 Resultados del modelado de carga como impedancia constante.

| P _{esp.} (MW) | V M1 (p.u.) | V M2 (p.u.) | P _c (MW) | Iteraciones M1 | Iteraciones M2 |
|---------------------------|-----------------|-----------------|------------------------|-------------------|-------------------|
| 25 | 1.0035 | 1.0033 | 25.1504 | 2 | 2 |
| 50 | 0.9722 | 0.9709 | 47.1294 | 3 | 3 |
| 75 | 0.9400 | 0.9403 | 66.2654 | 3 | 3 |
| 100 | 0.9104 | 0.9105 | 82.7513 | 3 | 3 |
| 125 | 0.8801 | 0.8818 | 97.8444 | 4 | 3 |
| 150 | 0.8515 | 0.8543 | 109.8082 | 6 | 3 |
| 180 | 0.8188 | 0.8202 | 121.0885 | 18 | 4 |
| 200 | - | 0.7994 | 127.7975 | - | 4 |
| 300 | - | 0.7057 | 149.3255 | - | 4 |

Tabla 2.2 Resultados del modelado de carga como corriente constante.

| P_{esp.} (MW) | V M1 y M2 (p.u.) | P_c (MW) | Iteraciones M1 | Iteraciones M2 |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 25 | 1.0033 | 25.1504 | 2 | 2 |
| 50 | 0.9693 | 48.1965 | 3 | 3 |
| 75 | 0.9334 | 70.1949 | 3 | 4 |
| 100 | 0.8956 | 90.1229 | 4 | 4 |
| 125 | 0.8528 | 109.0145 | 4 | 5 |
| 150 | 0.8062 | 125.6787 | 6 | 5 |
| 180 | 0.7333 | 144.3697 | 11 | 7 |
| 200 | - | 154.6017 | - | 8 |

Tabla 2.3 Resultados del modelado de carga como potencia constante.

| P_{esp.} (MW) | V M1 y M2 (p.u.) | P_c (MW) | Iteraciones M1 | Iteraciones M2 |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 25 | 1.0033 | 25.1504 | 2 | 2 |
| 50 | 0.9678 | 49.2326 | 3 | 3 |
| 75 | 0.9260 | 74.3514 | 3 | 4 |
| 100 | 0.8757 | 99.3957 | 3 | 5 |
| 125 | 0.8111 | 124.1105 | 4 | 6 |
| 150 | 0.7054 | 149.3422 | 4 | 9 |

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Si se desea obtener el comportamiento completo de la característica P-V se debe usar otro procedimiento, el cual se obtiene determinando la ecuación de la malla correspondiente del sistema de prueba 1 u otro [35, 51].

En la Figura 2.9 se presenta el comportamiento completo de las curvas P-V para diferentes factores de potencia. Se observa que existen diferentes límites de transmisión de potencia activa, al variar la potencia reactiva demandada (factor de potencia), el problema que se presenta es el de colapso de voltaje (en el programa de flujos se presenta como problemas de convergencia), de ahí la necesidad de tener fuentes de reactivos locales.

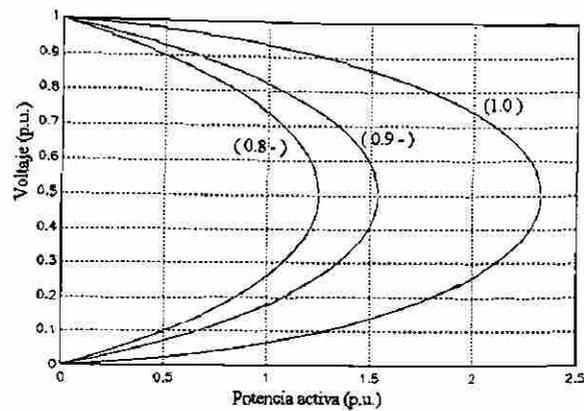


Fig. 2.9 Características P-V para diferentes factores de potencia.

En la Figura 2.10 se ilustra el problema de convergencia de los modelos de carga implementados, los cuales se presentan cuando la demanda aumenta o se pierde alguna línea de transmisión.

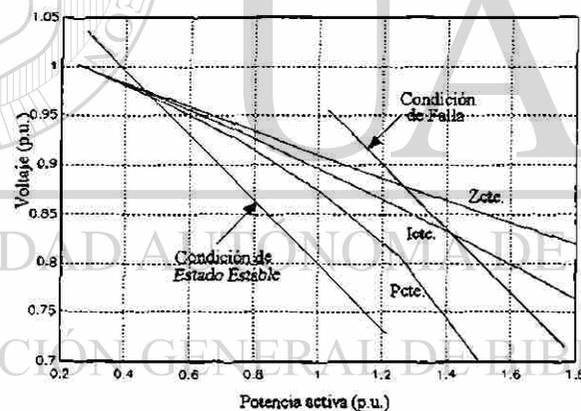


Fig. 2.10 Características que muestran los problemas de convergencia.

En la Figura 2.10 se observa que antes del disturbio la característica de todos los modelos de carga cruzan la característica del sistema prácticamente en un mismo punto, sin embargo, cuando ocurre la falla la característica del sistema se desplaza provocando que sólo algunos modelos de carga corten la característica, reflejándose como un problema de convergencia o colapso de voltaje.

2.6 SISTEMA DE PRUEBA 2.

En la Figura 2.11 se presenta un sistema de prueba de 230 KV, formado por líneas de diferentes longitudes con parámetros típicos (ver Apéndice para datos).

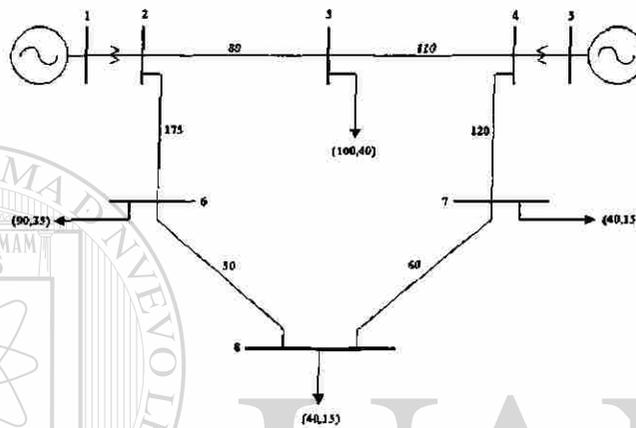


Fig. 2.11 Sistema de Prueba 2.

En la Figura 2.12 se muestra la forma de representar la carga en estudios de flujos de potencia para cada una de las modelaciones implementadas.

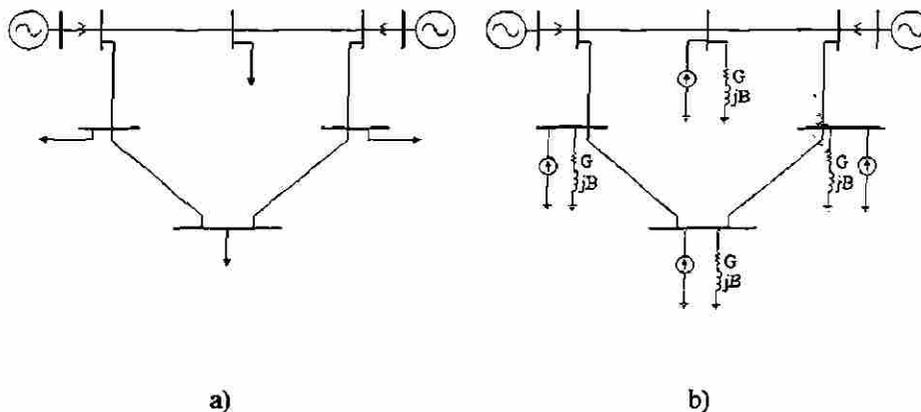


Fig. 2.12 Representación de carga en flujos. a) Inyección nodal, b) Equivalente Norton.

En la Tabla 2.4 se resumen los resultados del caso base en los cuales se observa que los voltajes permanecen dentro de un rango aceptable, excepto los nodos 6 y 8, los cuales toman un valor por abajo del valor mínimo permitido para el modelo de carga como potencia constante. Se observa que el número de iteraciones con los modelos de carga como corriente e impedancia constante es mayor que para el modelo de carga como potencia constante.

Tabla 2.4 Resultados del caso base para el modelado de carga como Inyección nodal.

| P cte. | I cte. | Z cte. |
|---------------|---------------|---------------|
| 3 Iteraciones | 4 Iteraciones | 4 Iteraciones |
| V1 = 1.0250 | V1 = 1.0250 | V1 = 1.0250 |
| V2 = 1.0034 | V2 = 1.0053 | V2 = 1.0070 |
| V3 = 0.9804 | V3 = 0.9828 | V3 = 0.9850 |
| V4 = 0.9922 | V4 = 0.9941 | V4 = 0.9959 |
| V5 = 1.0000 | V5 = 1.0000 | V5 = 1.0000 |
| V6 = 0.9487 | V6 = 0.9551 | V6 = 0.9608 |
| V7 = 0.9586 | V7 = 0.9638 | V7 = 0.9686 |
| V8 = 0.9496 | V8 = 0.9558 | V8 = 0.9613 |

La Figura 2.13 muestra el perfil de voltaje en los nodos del sistema para cada caso del modelo de carga como Inyección nodal.

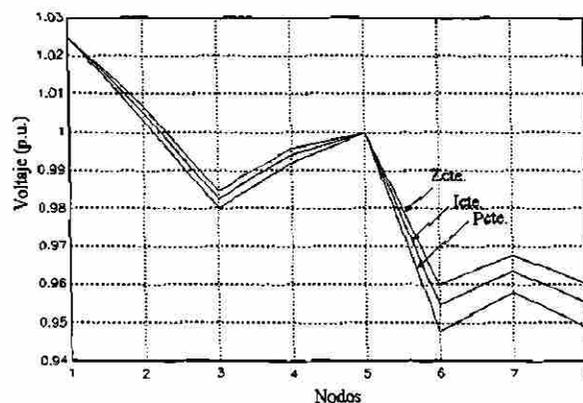


Fig. 2.13 Perfiles de voltaje para el modelado de carga como Inyección nodal.

Como variante al caso base se considera un aumento del 90% en la demanda en todas las cargas del sistema, los resultados se resumen en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Resultados para un incremento de demanda del 90 %.

| P cte. | I cte. | Z cte. |
|-------------|----------------|----------------|
| No Converge | 10 Iteraciones | 19 Iteraciones |
| | V1 = 1.0250 | V1 = 1.0250 |
| | V2 = 0.9440 | V2 = 0.9618 |
| | V3 = 0.9006 | V3 = 0.9214 |
| | V4 = 0.9398 | V4 = 0.9548 |
| | V5 = 1.0000 | V5 = 1.0000 |
| | V6 = 0.8086 | V6 = 0.8520 |
| | V7 = 0.8416 | V7 = 0.8770 |
| | V8 = 0.8151 | V8 = 0.8564 |

Los resultados de la Tabla 2.5 muestran que al modelar la carga como potencia constante se tiene un problema de convergencia, con los otros dos modelos se obtiene convergencia en valores bajos de voltaje en un número elevado de iteraciones.

En la Figura 2.14 se presentan en forma gráfica los resultados del nivel de voltaje contra los nodos del sistema.

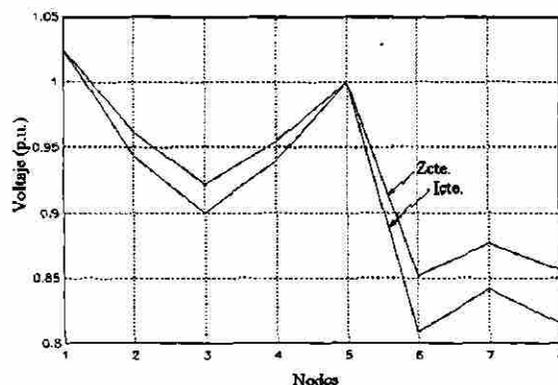


Fig. 2.14 Perfiles de voltaje para un incremento en la demanda del 90%.

La Tabla 2.6 muestra los resultados obtenidos para el caso base utilizando equivalentes Norton para modelar la carga. Se observa una convergencia rápida, llegando a valores de voltaje dentro del rango aceptable, excepto en los nodos 6 y 8 para el modelo de carga como potencia constante.

Tabla 2.6 Resultados del caso base para el modelado de carga con equivalentes Norton.

| P cte. | I cte. | Z cte. |
|---------------|---------------|---------------|
| 5 Iteraciones | 4 Iteraciones | 3 Iteraciones |
| V1 = 1.0250 | V1 = 1.0250 | V1 = 1.0250 |
| V2 = 1.0032 | V2 = 1.0052 | V2 = 1.0068 |
| V3 = 0.9802 | V3 = 0.9827 | V3 = 0.9847 |
| V4 = 0.9920 | V4 = 0.9940 | V4 = 0.9957 |
| V5 = 1.0000 | V5 = 1.0000 | V5 = 1.0000 |
| V6 = 0.9483 | V6 = 0.9548 | V6 = 0.9599 |
| V7 = 0.9582 | V7 = 0.9636 | V7 = 0.9679 |
| V8 = 0.9492 | V8 = 0.9555 | V8 = 0.9605 |

En forma gráfica los resultados del perfil de voltaje de los nodos del sistema, para la modelación de carga con equivalentes Norton, se presenta en la Figura 2.15.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

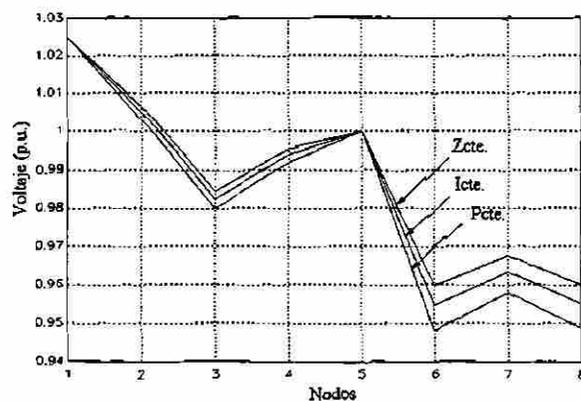


Fig. 2.15 Perfil de voltaje para modelado de carga como Equivalentes Norton.

Si se incrementa el nivel de demanda en un 90% se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 2.7 y en la Figura 2.16.

Tabla 2.7 Resultados para un incremento de demanda del 90%.

| P cte. | I cte. | Z cte. |
|---------------|---------------|---------------|
| No Converge | 6 Iteraciones | 4 Iteraciones |
| | V1 = 1.0250 | V1 = 1.0250 |
| | V2 = 0.9374 | V2 = 0.9623 |
| | V3 = 0.8936 | V3 = 0.9221 |
| | V4 = 0.9343 | V4 = 0.9553 |
| | V5 = 1.0000 | V5 = 1.0000 |
| | V6 = 0.7916 | V6 = 0.8534 |
| | V7 = 0.8281 | V7 = 0.8782 |
| | V8 = 0.7991 | V8 = 0.8577 |

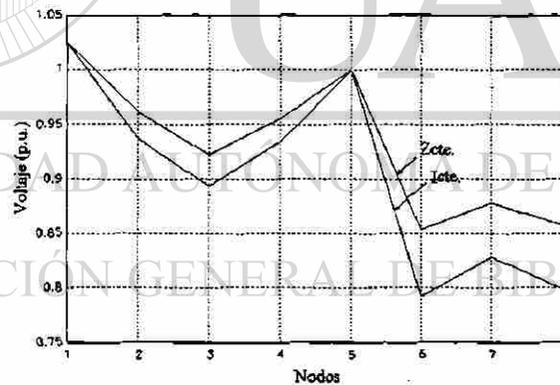


Fig. 2.16 Perfiles de voltaje para un incremento de demanda de 90%.

De los resultados de la Tabla 2.7 se puede observar un problema de convergencia cuando la carga se modela como potencia constante. Para corriente e impedancia constante se obtiene convergencia en menos iteraciones, respecto a la modelación con Inyecciones de potencia (Tabla 2.5).

De las Tablas 2.5 y 2.7 se observan diferencias importantes en cuanto al número de iteraciones. Con el modelo de carga con Inyecciones nodales la solución se obtiene en un número elevado de iteraciones, en tanto que con equivalentes Norton la solución se obtiene en menos iteraciones.

En general, en sistemas de potencia reales se pueden presentar cambios los cuales presentan problemas de convergencia en la solución del estudio de flujos, los que dependen en gran parte del modelo de carga utilizado, teniendo más problemas el modelo de potencia constante que cualquiera de las otras modelaciones.

2.7 CONCLUSIONES.

- Al modelar las cargas eléctricas en función del voltaje se obtiene una respuesta más real del comportamiento de los flujos de potencia en un sistema.
- Se presentaron dos alternativas factibles para la modelación de cargas eléctricas en función del voltaje; una utiliza inyecciones de potencia, la otra emplea equivalentes Norton.
- Las dos alternativas de modelación permiten representar diversos modelos de carga particulares (potencia constante, corriente constante e impedancia constante) o combinaciones de ellos.
- Al utilizar equivalentes Norton en la modelación de carga, la matriz de admitancias del sistema se hace más dominante, con lo cual se obtiene un sistema de ecuaciones más estable y una mejor convergencia en el proceso de solución.
- Una desventaja menor de la representación de cargas con equivalentes Norton es el incremento en requerimientos computacionales para incluir el equivalente activo y pasivo de la carga.

- Con las dos alternativas de implementación probadas se obtienen aproximadamente los mismos resultados, magnitudes de voltaje y flujos de potencias, excepto cuando las variaciones de demanda son grandes, en este caso, el modelo basado en inyecciones nodales de potencia puede presentar problemas de convergencia.
- En los sistemas de prueba analizados, al modelar la carga con inyecciones nodales de potencia, el número de iteraciones para obtener la solución fue de 2-4, para cargas que demandan potencia constante, y de 2-6 para otros tipos de carga.
- Al utilizar equivalentes Norton en la modelación de carga, el número de iteraciones para obtener la solución fue de 2-6, para cargas que demandan potencia constante, y de 2-4 para otros tipos de carga.
- Si se desea mejorar la confiabilidad en la solución se recomienda representar la carga con equivalentes Norton.
- En las pruebas realizadas se observó que las cargas que demandan potencia constante causan más problemas de convergencia, tanto usando inyecciones nodales de potencia como empleando equivalentes Norton.

Capítulo 3

MODELADO DE COMPENSADORES ESTATICOS DE VAR'S EN ESTUDIOS DE FLUJOS

3.1 INTRODUCCION.

El Compensador Estático de Var's (CEV's) es una fuente de potencia reactiva, cuya potencia reactiva varía de tal forma que permite controlar el voltaje en el punto de conexión con el sistema eléctrico de potencia (SEP). El término estático es usado para indicar que el CEV es diferente a un condensador síncrono que tiene movimiento o compuesto de componentes rotatorias [17].

En la actualidad con el avance de la electrónica de potencia y las técnicas de control moderno, se han desarrollado CEV's, que son usados para el control de voltaje en los sistemas eléctricos de potencia los cuales tienen la habilidad para generar o absorber potencia reactiva, en forma prácticamente instantánea, ante cambios normales en el sistema y también durante contingencias [16, 17]. En SEP's robustos comúnmente se utilizan capacitores y reactores para el control de voltaje en estado estable, este control es llamado control discreto. En tanto que en sistemas longitudinales los CEV's se ha convertido en el medio más efectivo para el control de voltaje y potencia reactiva, lógicamente con un costo mayor, pero se logra tener un sistema más confiable y seguro en cuanto al control dinámico de voltaje y los márgenes de reserva de potencia reactiva [35].

Los CEV's están integrados básicamente por elementos pasivos, capacitores y/o reactores, incluyendo la lógica de control para el control del disparo de tiristores. La conexión/desconexión de capacitores se realiza en forma discreta mediante el control de tiristores en los periodos de conducción. La conexión de reactores se efectúa en forma controlada variando el ángulo de disparo de los tiristores, logrando de esa forma el control continuo de la corriente en el reactor [17].

La aplicación de CEV's en redes eléctricas proporciona las siguientes ventajas: incremento en la capacidad de transmisión de potencia, y el mejoramiento en el límite de estabilidad transitoria, entre otras. La efectividad de los CEV's en el control de voltaje en un punto del sistema depende de: la ubicación, el tipo de CEV, la cantidad de reactivos disponibles, la capacidad de control (tiempo disponible para lograr el cambio) y el punto de operación. Todos estos aspectos demandan el desarrollo de herramientas analíticas y metodológicas para el control de voltaje y potencia reactiva [17, 35].

3.2 CONFIGURACIONES TÍPICAS DE CEV'S.

Los CEV's están integrados por elementos pasivos, capacitores y/o reactores controlados por tiristores. Existen diferentes configuraciones [35] dependiendo del lugar o de la compañía que los fabrica, pero todos con el mismo fin, algunas configuraciones típicas son :

- a).- Capacitor Conmutado con Tiristores (CCT).
- b).- Reactor Controlado con Tiristores (RCT).
- c).- Combinación de CCT / RCT.
- d).- Transformador Controlado con Tiristores (TCT).
- e).- Reactor Saturable (RS).
- f).- Capacitor Conectado con Interruptor y RCT.

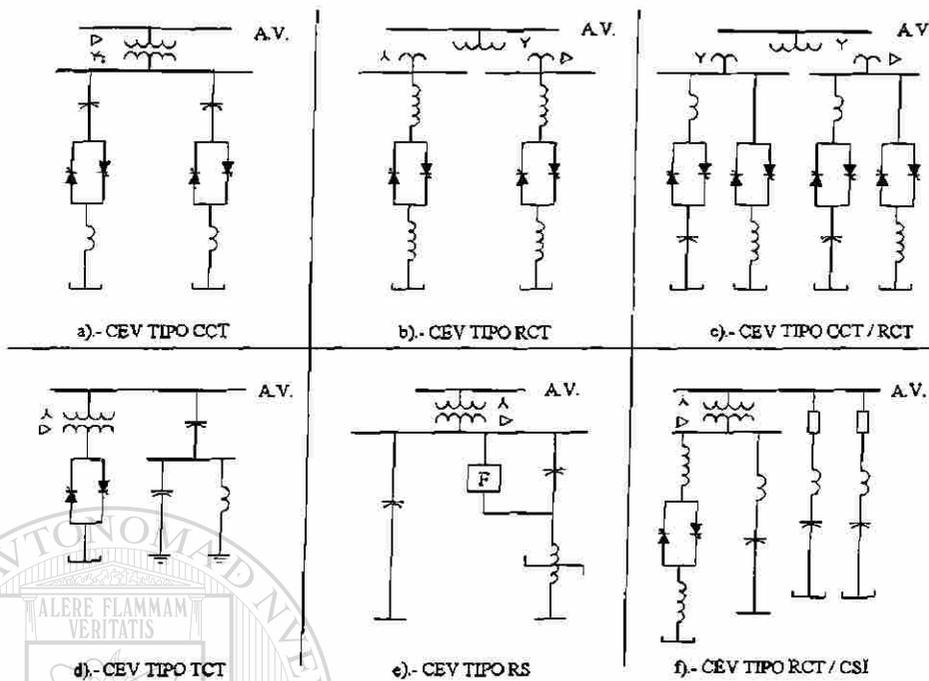


Fig. 3.1 Configuraciones típicas de Compensadores Estáticos de Var's.

Los elementos básicos de un CCT son: un capacitor en serie con un par de tiristores bidireccionales y un pequeño reactor con el fin de disminuir el transitorio en el momento de la conmutación, como se indica en la Figura 3.1 (a). Las ramas de capacitores son conectadas y/o desconectadas por medio de tiristores a voltaje pleno, el control de potencia reactiva es mediante pasos o escalones discretos, la Figura 3.2 muestra éste comportamiento [17].

En los CEV's tipo RCT y TCT la corriente a través de los reactores o devanados de transformadores se modula desde cero hasta la magnitud máxima modificando el ángulo de disparo de tiristores. Esto causa que la corriente no sea sinusoidal y se generen señales armónicas. La reducción de estas componentes se efectúa por medio de conexiones adecuadas de transformadores, filtros, etc. El control de la potencia reactiva en este caso es continuo, la Figura 3.3 muestra esta característica de operación [17].

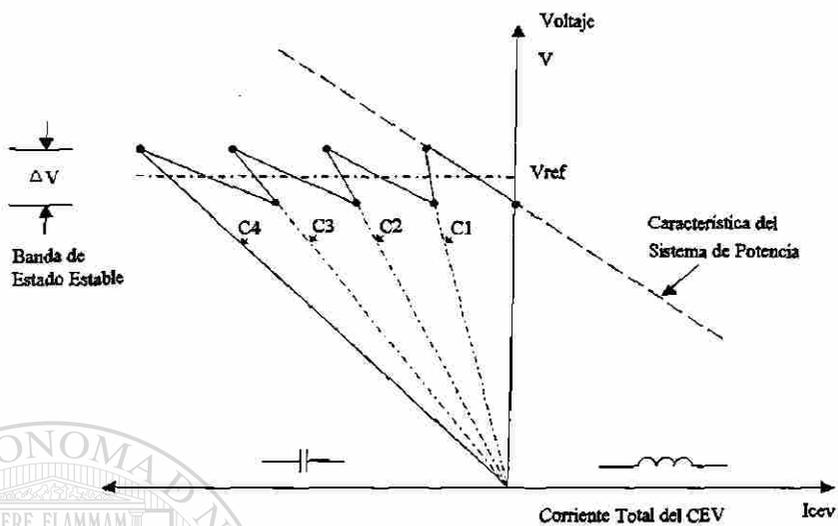


Fig. 3.2 Característica V-I de un CCT para control de voltaje en una banda operativa Δv .

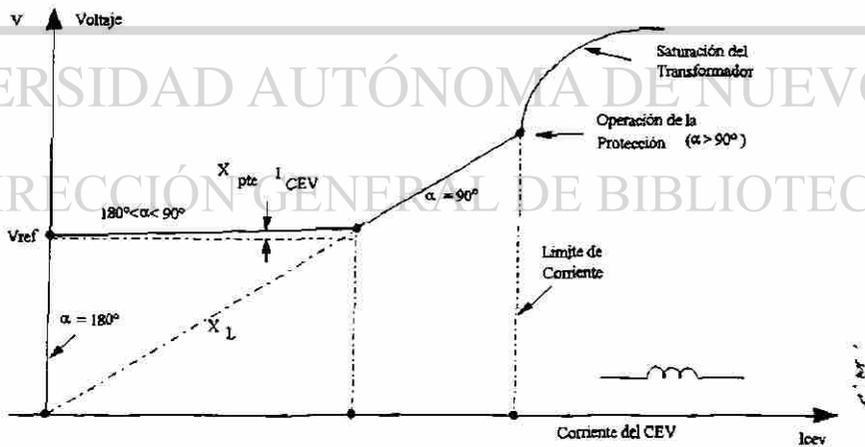


Fig. 3.3 Característica de operación de un RCT para control de voltaje y limitador de corriente incluyendo el transformador reductor.

Un SEP puede requerir diferentes tipos de CEV's en diversas condiciones operativas, por ejemplo, en demandas máximas los CEV's del tipo combinación CCT / RCT pueden considerarse adecuados. En estos niveles de demanda es de suma importancia contar con un control fino de potencia reactiva, ya que se mejora la cargabilidad de la red y se dispone de un soporte dinámico de voltaje para condiciones de contingencia.

En condiciones de demanda mínima la conexión de CEV's y de RCT, pueden reducir los sobrevoltajes a un nivel aceptable; absorbiendo el excedente de potencia reactiva capacitiva de las líneas. En redes de subtransmisión, ante condiciones de contingencia, salida de líneas, transformadores, etc. se usan los tipos CCT, que dan buenos resultados [16, 17, 21, 35, 36].

3.3 CARACTERÍSTICA DE OPERACION EN ESTADO ESTABLE DEL CEV Y LA INTERACCION CON EL SEP.

Un Compensador Estático de Var's influye en forma importante en el control de voltaje del sistema e impacta en la mejor distribución de la reserva de potencia reactiva. El CEV desde el punto de vista de control es un elemento pasivo cuya susceptancia se modifica de acuerdo al voltaje del nodo controlado. El objetivo principal del CEV es regular el voltaje de un nodo mediante la inyección controlada de potencia reactiva, esto se realiza mediante la conversión de una señal de error de voltaje en una señal de cambio del valor de susceptancia [17, 35].

En la Figura 3.4 se presenta un diagrama de bloques simplificado del sistema de control del CEV, el cual es comúnmente utilizado en estudios de estabilidad transitoria.

En el diagrama de bloques no se incluye el modelo del filtro, ni la lógica de distribución de susceptancia, esto debido a que sus constantes de tiempo son muy pequeñas considerando las frecuencias de oscilación típicas del fenómeno estudiado. En estudios de sobrevoltajes transitorios estas componentes deben ser incluidos para un análisis adecuado.

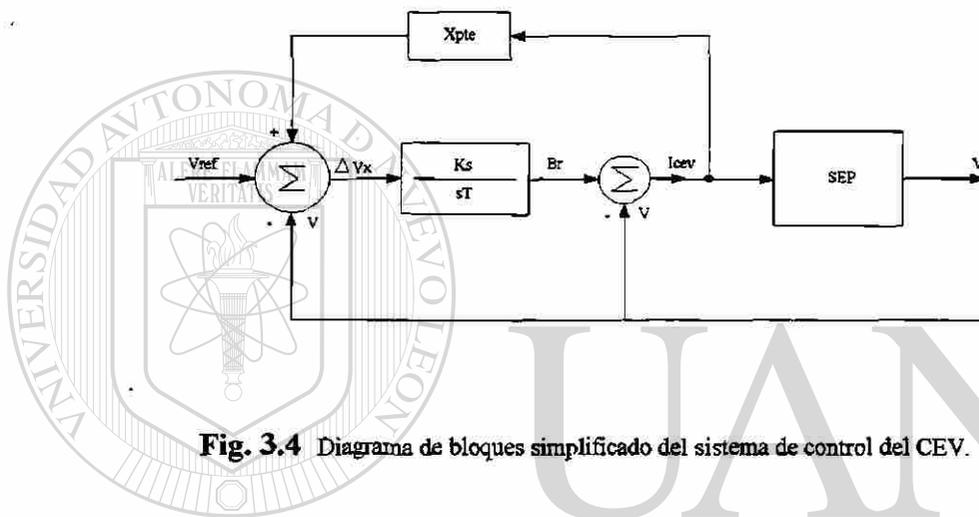


Fig. 3.4 Diagrama de bloques simplificado del sistema de control del CEV.

Del diagrama de la Figura 3.4, si la señal de error ΔV_x es cero, se tiene la condición de operación de estado estable [35], de esta forma se mantiene el mismo valor de susceptancia y la corriente del CEV (I_{cev}) y el voltaje (V) del nodo controlado no cambian.

De acuerdo con lo anterior se tiene :

$$\Delta V_x = V_{ref} + X_{pte} I_{cev} - V = 0 \quad (3.1)$$

o bien

$$V = V_{ref} + X_{pte} I_{cev} \quad (3.2)$$

La ecuación (3.2) define la característica del CEV en estado estable en función de dos parámetros importantes :

- El voltaje de referencia (V_{ref}).
- La pendiente compensadora (X_{pte}).

Estos dos parámetros son ajustables y tienen un efecto importante en el control de voltaje en el punto de conexión con el sistema (control local) o en un punto remoto del mismo controlando la inyección de reactivos. En la Figura 3.5 se muestran dos características (V - I) del CEV en estado estable con diferente pendiente:

- Característica de operación plana (A).
- Característica de operación polarizada (B).

En la característica B se observa que el voltaje a controlar varía de acuerdo a la inyección de reactivos del CEV, el voltaje de referencia sólo se podrá obtener cuando el compensador estático de var's no inyecte reactivos al sistema [35, 36].

En la característica A se eliminó la compensación por corriente y se tiene un control plano del voltaje. Tanto para la característica A, como para B la generación/absorción de reactivos es limitada.

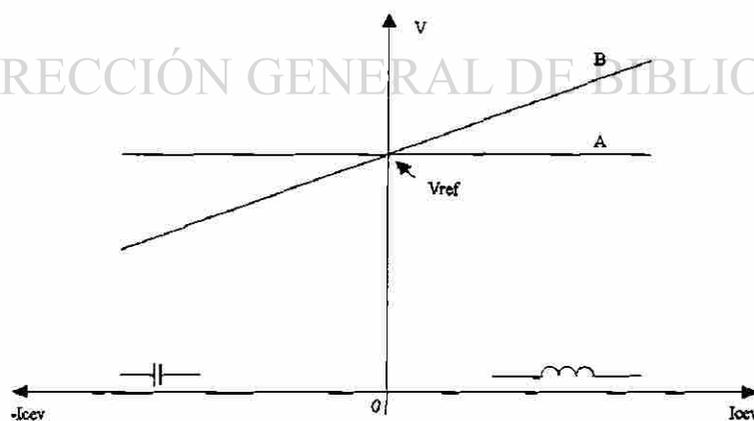


Fig. 3.5 Características de operación de CEV.

Para cualquier tipo de CEV y estrategia de control, su característica de operación de estado estable [16, 17, 35, 36] incluye tres zonas o rangos de control (Figura 3.6).

- a) Una zona lineal de operación definida por dos parámetros de control; voltaje de referencia y pendiente compensadora, el voltaje del nodo controlado en esa zona es regulado entre los límites de potencia reactiva mínima (máximo capacitivo) y máxima (máximo inductivo) para el intervalo de variación de voltaje (V_{\min} y V_{\max}). Se considera que la corriente del CEV es aproximadamente igual a la potencia reactiva ($I_{\text{cev}} \approx Q_{\text{cev}}$). Este es el modo normal de operación.
- b) Una zona de operación de bajo voltaje, en esta zona la operación del CEV está determinada por la rama capacitiva, con el voltaje en terminales variando entre cero y V_{\min} , de acuerdo a las condiciones del sistema.
- c) Una zona de operación de sobrevoltaje, en esta zona la operación del CEV corresponde a un reactor fijo, con una capacidad nominal igual al valor de la rama inductiva.

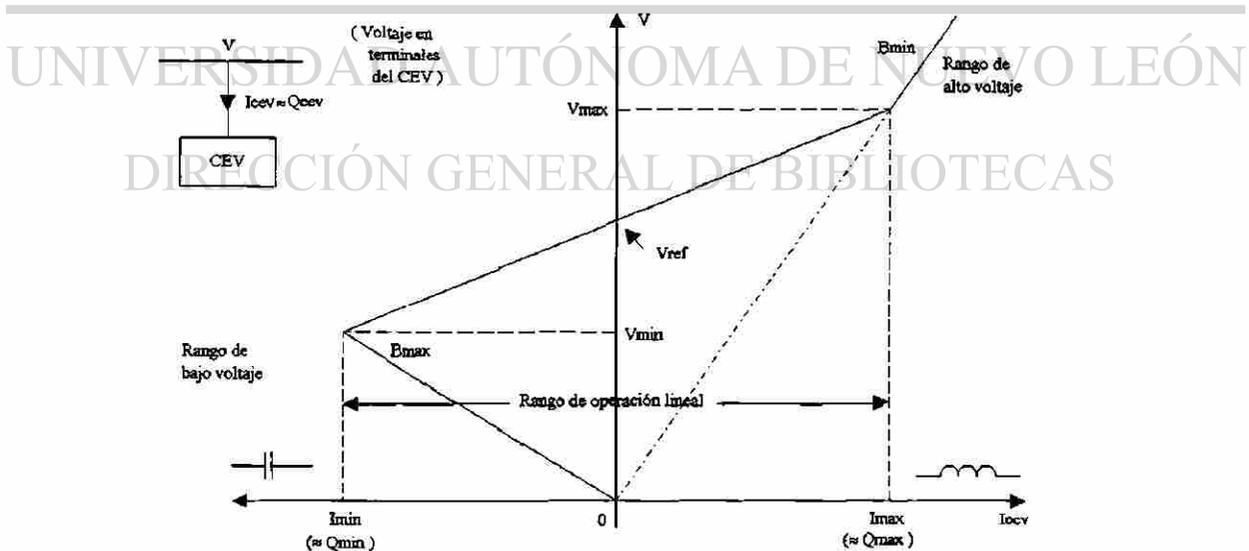


Fig. 3.6 Característica de operación del CEV en estado estable y sus zonas de operación.

La curva característica de operación del CEV se comprende plenamente cuando se analiza su interacción con el sistema de potencia. La Figura 3.7 muestra diferentes características del sistema eléctrico, las cuales varían de acuerdo a las condiciones de operación, topología, generación y carga [16, 36].

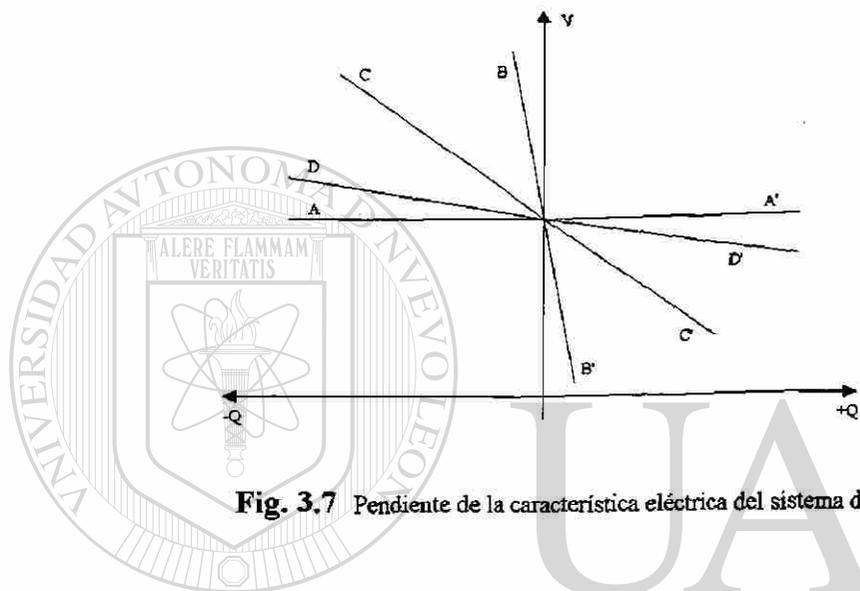


Fig. 3.7 Pendiente de la característica eléctrica del sistema de potencia.

En la característica A-A' se tiene un nodo infinitamente robusto donde los cambios de potencia reactiva (Q) no afectan el voltaje, mientras que la característica B-B' muestra un nodo casi infinitamente débil donde una pequeña variación de potencia reactiva produce cambios considerables en el voltaje de dicho nodo.

El análisis en estado estable una vez que se conecta el CEV al sistema, utiliza las características del CEV y del SEP simultáneamente. Los cambios en las condiciones de operación del SEP y los parámetros ajustables del CEV se pueden analizar sobre la combinación de ambas características determinando el punto de operación [16, 35, 36].

El punto de operación debe estar sobre la característica (plana o polarizada) del Compensador Estático de Var's, Figura 3.5, su localización lo define la característica de operación del sistema de potencia. Al cambiar la demanda, generación o configuración del sistema el punto de operación se desplaza sobre la característica del CEV modificando la inyección de reactivos para mantener el voltaje de acuerdo a la pendiente especificada [35].

- El cruce de la característica del CEV con el eje del voltaje. Determina el voltaje de referencia.
- El cruce de la característica del sistema con el eje de voltaje. Determina el voltaje que se tendría sin CEV.
- La intersección de las características del SEP y del CEV. Determina el punto de operación.

La Figura 3.8 muestra diferentes condiciones de operación del sistema de potencia en combinación con los parámetros ajustables del Compensador Estático de Var's.

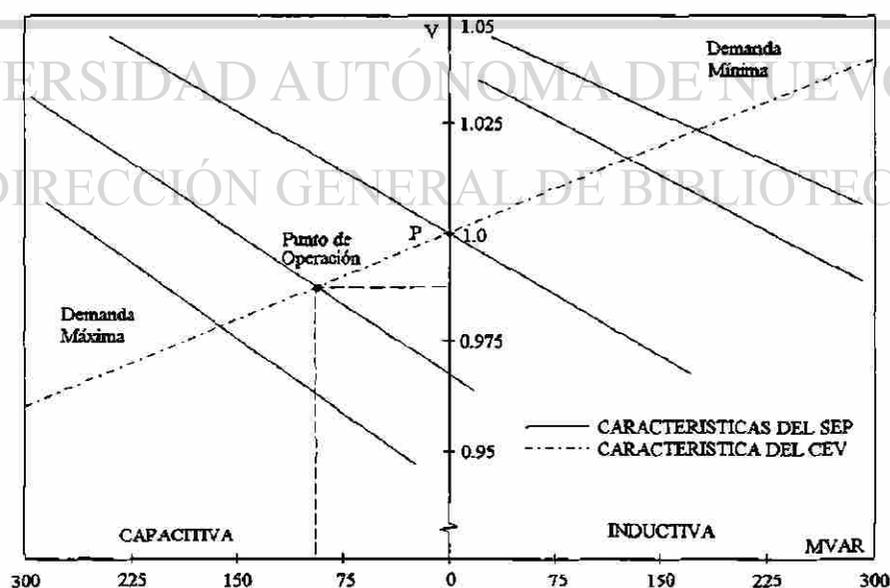


Fig. 3.8 Punto de operación del CEV para diferentes condiciones de operación.

Es importante notar el desplazamiento de las características del sistema de acuerdo con la demanda en el punto de interés del sistema. En el caso mostrado en el Figura 3.8 se observa que con demanda máxima se tiene una inyección capacitiva y un voltaje menor que el voltaje de referencia, mientras que en demanda mínima se tiene una inyección inductiva y se presenta un voltaje mayor al de referencia. Cuando se hacen coincidir los tres puntos antes mencionados (punto P de la Figura 3.8), el CEV no está generando ni absorbiendo reactivos, así que se puede lograr una transición suave para conectarlo o desconectarlo del sistema [35].

3.4 MODELO DEL COMPENSADOR ESTÁTICO DE VAR'S (CEV).

El modelo del CEV que se utiliza en un estudio de flujos de potencia depende de si opera dentro o fuera de su rango lineal de operación, como puede apreciarse en la Figura 3.6. El flujo de potencia reactiva (Q) fluye del punto común de acoplamiento con el sistema hacia dentro del CEV; cuando opera dentro del rango lineal de control lo puede hacer con característica polarizada o plana y si opera fuera del rango de control, la susceptancia equivalente (B) del CEV tiene la siguiente convención de signo [17, 36].

Si $Q > 0$ o $B < 0$ El CEV opera en la zona de sobre voltaje y se comporta como un inductor.

Si $Q < 0$ o $B > 0$ El CEV opera en la zona de bajo voltaje y se se comporta como un capacitor.

En la Figura 3.9 se muestra la representación del CEV para control de voltaje en estudios de flujos de potencia.

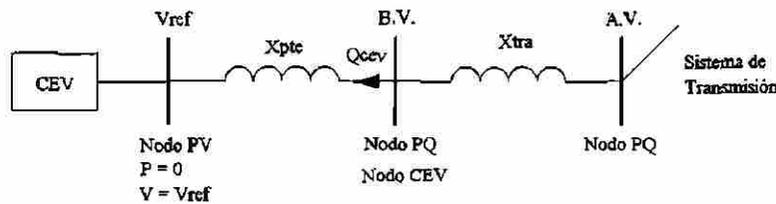


Fig. 3.9 Representación del CEV para control de voltaje en flujos de potencia.

3.4.1 Modelación del CEV con Característica Polarizada.

La forma de modelar el Compensador Estático de Var's dentro del rango lineal de operación con característica polarizada es como un nodo PV en un nodo auxiliar interno de voltaje controlado con $P = 0$ y $V = V_{ref}$, una reactancia-pendiente (X_{pte}) equivalente a la pendiente de la característica polarizada de estado estable del CEV; incluida entre el punto de conexión con el sistema (nodo CEV) y el nodo PV (auxiliar interno). El nodo en el punto común con el sistema (lado de baja del transformador) es un nodo de carga tipo PQ (nodo CEV) con condiciones $P = 0$, $Q = 0$ cuyo voltaje representa el voltaje en terminales del CEV con característica polarizada, como se presenta en la Figura 3.10.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

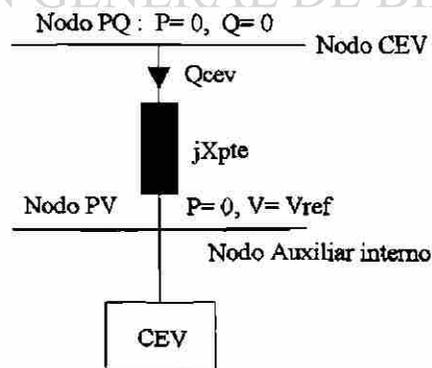


Fig. 3.10 Modelo del CEV con Característica Polarizada.

3.4.2 Modelación del CEV con Característica Plana.

El modelo del Compensador Estático de Var's (CEV) con característica plana es un caso particular del modelo con característica polarizada, cuando la reactancia-pendiente es igual a cero ($X_{pte} = 0$), en este caso el nodo PQ del lado de baja del transformador y el nodo auxiliar interno tipo PV pasan a ser un mismo punto, teniendo únicamente un sólo nodo tipo PV de voltaje controlado con $P = 0$ y $V = V_{ref}$ como se muestra en la Figura 3.11, este modelo es similar al de un generador.

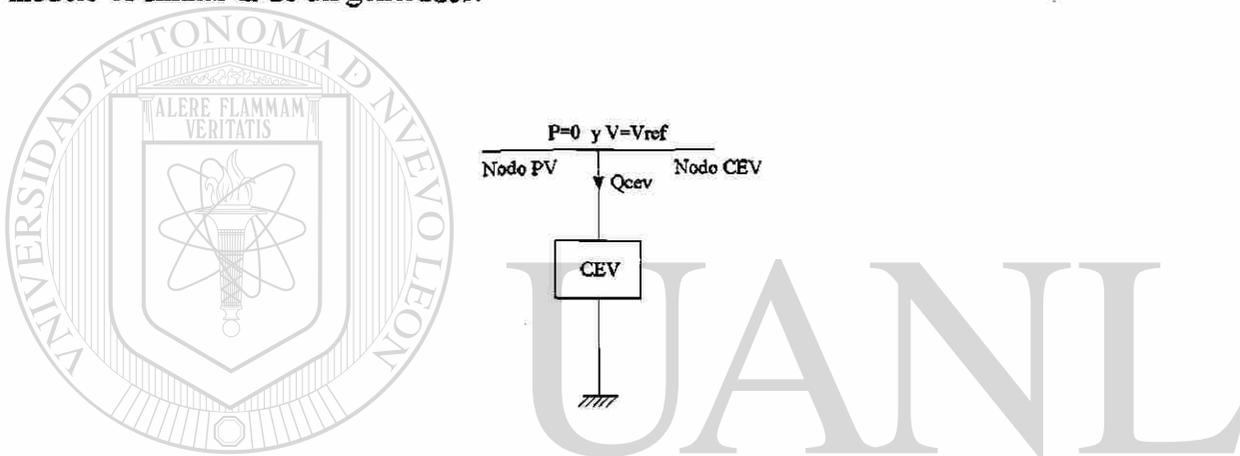


Fig. 3.11 Modelo del CEV con Característica Plana.

3.5 MODELO DEL COMPENSADOR ESTÁTICO DE VAR'S CON CONTROL REMOTO (CEVR).

De igual forma que el modelo del CEV, la representación del Compensador Estático de Var's con control remoto de voltaje (CEVR) que se utiliza en los estudios de flujos de potencia depende de si opera dentro o fuera de su rango lineal de operación; la diferencia en la representación está en el punto de control de voltaje, en el modelo del CEVR el punto a controlar es el lado de alta del transformador, como se muestra en la Figura 3.12 [36].

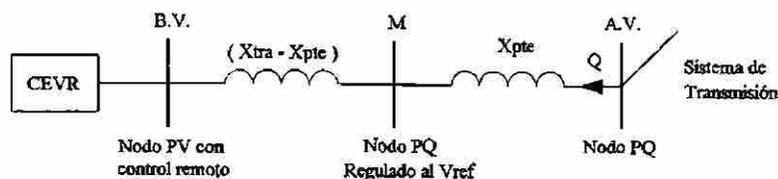


Fig. 3.12 Representación del CEVR para control de voltaje en estudios de flujos.

3.5.1 Modelación del CEVR con Característica Polarizada.

La modelación dentro del rango lineal de operación con característica polarizada es como se muestra en la Figura 3.12, se requiere hacer la diferencia entre las reactancias del transformador y la reactancia-pendiente conectada entre dos nodos; un nodo tipo PV con control remoto de voltaje y otro nodo tipo PQ (nodo ficticio M) con voltaje regulado al voltaje de referencia; entre este último y el nodo tipo PQ (punto común con el sistema) se conecta la reactancia-pendiente que simula la característica polarizada básica de estado estable del CEVR. El objetivo principal de la modelación del CEVR es regular el voltaje del nodo M al voltaje de referencia, mediante cambios en el voltaje del nodo tipo PV (lado de baja del transformador).

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

3.5.2 Modelación del CEVR con Característica Plana.

En la modelación con característica plana la reactancia-pendiente (X_{pte}) es cero, como se muestra en la Figura 3.13, el nodo ficticio M no se considera en esta representación, por lo que se tiene únicamente la reactancia del transformador entre los nodos tipo PV con control remoto de voltaje y el nodo tipo PQ regulado al voltaje de referencia, que ahora es el punto común con el sistema.

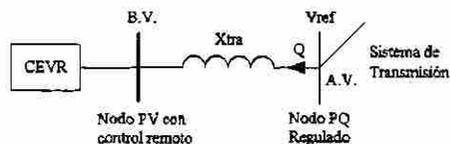


Fig. 3.13 Modelo del CEVR con Característica Plana.

3.6 MODELACION DEL CEV Y DEL CEVR FUERA DEL RANGO LINEAL DE OPERACION.

Cuando la demanda del sistema es muy alta o muy baja se pueden presentar violaciones en los límites de potencia reactiva de los compensadores, si esto se presenta, se debe liberar el control de voltaje cambiando de tipo de nodo; se cambia a un nodo de carga tipo PQ, el cual puede ser modelado en un estudio de flujos de potencia de dos maneras; como un nodo de carga PQ con $P = 0$ y Q de acuerdo al límite violado, o como un elemento en derivación de susceptancia (B) de acuerdo con (3.3) y (3.4) [16, 17, 35, 36].

Si el límite violado es el mínimo (máximo capacitivo) $Q_{cev} < Q_{min}$ y $V < V_{min}$, según la Figura 3.6, la susceptancia (B) está determinada por la rama capacitiva, esto es:

$$B = B_{max} \quad (3.3)$$

Si el límite violado es el límite máximo (máximo inductivo) $Q_{cev} > Q_{max}$ y $V > V_{max}$ según la Figura 3.6, la susceptancia (B) está determinada por la rama inductiva, dada por:

$$B = B_{min} \quad (3.4)$$

La Figura 3.14 muestra las dos representaciones del nodo de carga cuando se violan los límites de reactivos, son válidas para ambas modelaciones del CEV y del CEVR con característica polarizada y plana.

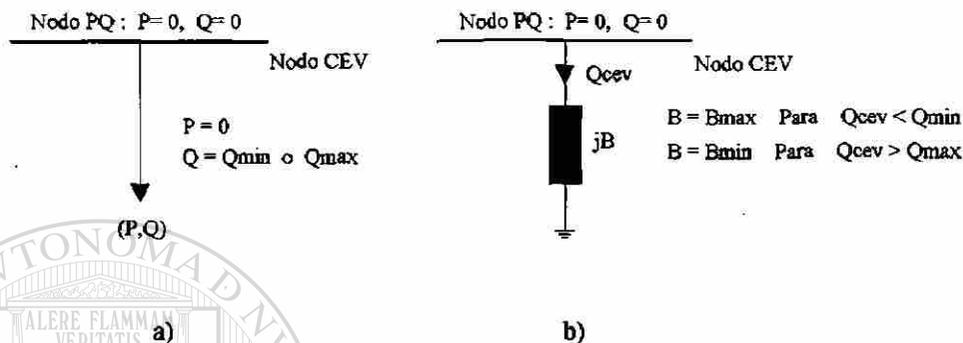


Fig. 3.14 Modelado del CEV cuando opera fuera de su rango lineal de operación.

a) Como nodo de carga PQ, b) Como susceptancia.

3.7 INCLUSION DEL MODELO DEL CEV EN UN ESTUDIO DE FLUJOS.

Para incluir el modelo del CEV con característica de operación polarizada en un estudio de flujos de potencia se requiere agregar dos nodos, una línea y el transformador de conexión. Un nodo de carga (PQ) cuyo voltaje es el voltaje en terminales del CEV y otro nodo de voltaje controlado (PV) con voltaje igual al voltaje de referencia. El nodo PQ conectado al sistema mediante el transformador y el nodo PV conectado al nodo PQ a través de la línea cuya reactancia representa la pendiente de la característica de operación (Figura 3.9).

Para la inclusión del modelo del CEV en el programa de flujos de potencia [46] con característica de operación plana, se requiere agregar un nodo de voltaje controlado (PV) conectado al sistema mediante el transformador de conexión, similar a un generador (Figura 3.11).

El procedimiento de control consiste en determinar el valor de la corriente reactiva durante el proceso iterativo de solución. Si el valor se encuentra dentro de los límites de potencia reactiva especificados, el nodo de voltaje controlado (PV) sigue siendo del mismo tipo, pero si el valor de la corriente reactiva se encuentra fuera del límite, el nodo PV pasa a ser nodo de carga.

En la Figura 3.15 se muestra la representación del modelo del CEV con una lógica de control externa.

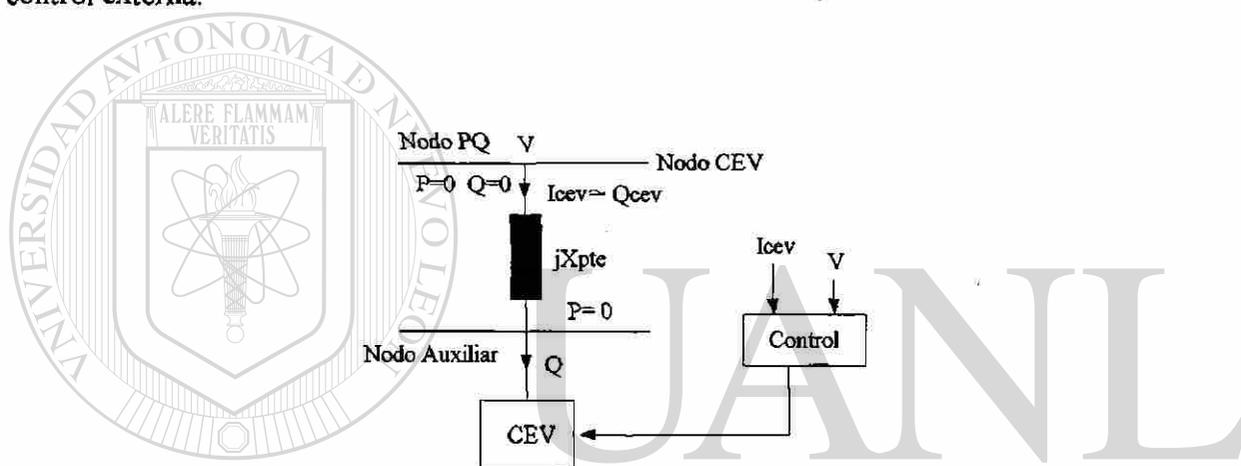


Fig. 3.15 Modelado del CEV con la lógica de control externa.

Durante una corrida de flujos de potencia no es recomendable que el CEV opere fuera de su rango lineal de operación, debido a que puede ocasionar problemas de convergencia. Gráficamente se observa en la Figura 3.16 el comportamiento del CEV fuera de los límites [17].

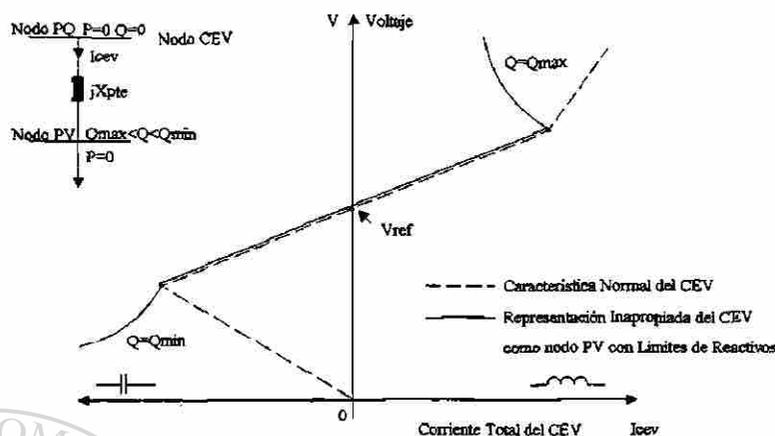


Fig. 3.16 Comportamiento del CEV fuera de sus límites de reactivos.

3.8 INCLUSIÓN DEL MODELO DEL CEVR EN UN ESTUDIO DE FLUJOS.

La configuración mostrada en la Figura 3.12, puede usarse para representar el modelo del Compensador Estático de Var's con control Remoto de voltaje (CEVR) en un estudio de flujos de potencia, se incluye un nodo ficticio M, y dos líneas; una con el valor de la reactancia-pendiente (X_{pte}) y la otra con la diferencia de reactancias del transformador y la reactancia-pendiente ($X_{tra}-X_{pte}$), esto permite que el CEVR opere en el modo lineal con característica de operación polarizada. En este modo el CEVR es representado como un nodo de voltaje controlado con potencia activa igual a cero y controlando el voltaje del nodo ficticio M al voltaje de referencia.

La representación del modelo del CEVR con característica de operación plana (Figura 3.13), requiere agregar un nodo de voltaje controlado conectado al sistema mediante la reactancia del transformador de conexión. La lógica de control es la misma que utiliza la representación del CEV.

El voltaje del nodo PV con control remoto (CEVR) es usado como parámetro de control, para controlar el voltaje del nodo ficticio M (Figura 3.12) al voltaje de referencia. Para esto, se aplica un coeficiente de sensibilidad que relaciona los cambios del voltaje del nodo ficticio M ante los cambios en el voltaje del nodo PV con control remoto CEVR, según (3.7) [15, 20, 21, 35].

$$S_{\text{CEVR},M} = \frac{\Delta V_M}{\Delta V_{\text{CEVR}}} \quad (3.7)$$

En forma general, se puede determinar el coeficiente de sensibilidad para controlar el voltaje de un nodo m de carga del sistema con pendiente plana o polarizada, mediante los cambios en el voltaje del nodo k de voltaje controlado (nodo CEVR), de la forma siguiente:

$$S_{km} = -M_m^t (J)^{-1} N \quad (3.8)$$

donde: M_m^t Vector disperso con (+1) en la posición m .

$(J)^{-1}$ Matriz Jacobiana inversa.

N Vector disperso con $+b_{kj}$ en la posición j , para cada nodo j conectado al nodo k .

Los cambios en el voltaje del nodo k de voltaje controlado (nodo CEVR) se determinan de acuerdo con:

$$V_k = V_k^{\text{esp}} + \Delta V_k \quad (3.9)$$

donde: $\Delta V_k = \frac{\Delta V_m}{S_{km}} = \frac{(V_m^{\text{esp}} - V_m)}{S_{km}}$

3.9 SISTEMA DE PRUEBA 1.

Un sistema típico en el cual se pueden presentar problemas de estabilidad de voltaje y donde el control de voltaje puede ser más apreciable con la aplicación de CEV's, es en el sistema radial mostrado en el Figura 3.17, el cual puede ser un equivalente de dos áreas interconectadas donde el área B requiere de un suministro adicional de potencia reactiva. Se utilizan datos típicos para la línea de interconexión (ver Apéndice para datos)

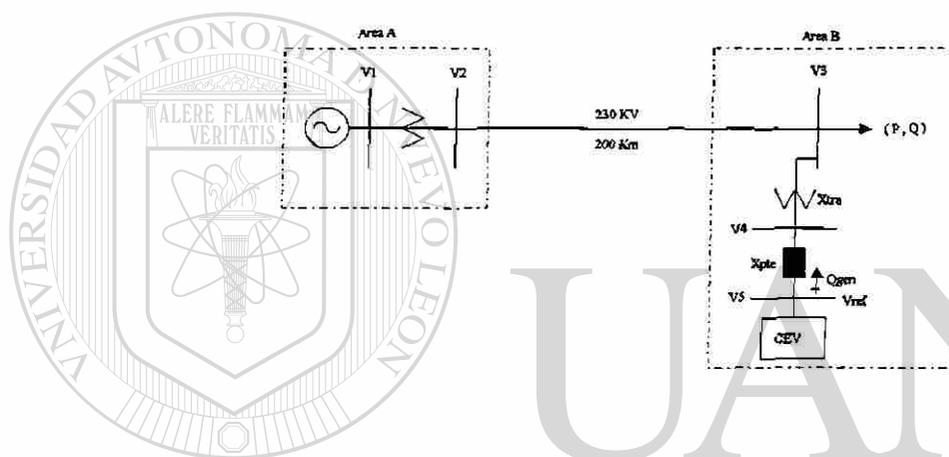


Fig. 3.17 Sistema de prueba 1 con aplicación del CEV's.

La Tabla 3.1 presenta diferentes resultados de simulaciones para el control de voltaje del nodo 3 (Área B) con la representación del Compensador Estático de Var's (CEV).

Tabla 3.1 Resultados de simulaciones en el sistema de prueba 1 con la aplicación de CEV's.

| CASO | P | Q | Xtra | Xpte | V1 | V2 | V3 | V4 | Vref | Qgen | iter |
|-------|----|----|------|------|-----|--------|--------|--------|------|-------|------|
| BASE | 80 | 30 | 0.04 | - | 1.0 | 0.9948 | 0.9297 | - | - | - | 3 |
| CEV'S | 80 | 30 | 0.04 | 0.05 | 1.0 | 1.0042 | 0.9822 | 0.9901 | 1.0 | 19.72 | 3 |
| CEV'S | 80 | 30 | 0.04 | 0.03 | 1.0 | 1.0047 | 0.9854 | 0.9937 | 1.0 | 20.91 | 3 |
| CEV'S | 80 | 30 | 0.04 | 0 | 1.0 | 1.0057 | 0.9908 | 1.0 | 1.0 | 22.99 | 3 |

La Tabla 3.2 presenta los resultados del estudio de flujo de potencia con la aplicación del CEVR, se debe notar el efecto de la reactancia-pendiente sobre el voltaje del nodo 3 (Figura 3.18), el impacto del cambio en el voltaje del nodo 5 (V_{rem}) para controlar el voltaje del nodo 4 (V_{ref}) al voltaje de referencia y la generación de potencia reactiva. Se muestra para este caso que la solución se obtiene en 4 iteraciones.

Para verificar que se cumpla con la pendiente se utiliza (3.2) con la aproximación de $I_{cev} \approx Q_{cev}$, la cual también se demostrará en una simulación completa. Por ejemplo, para la característica polarizada del 5%, de los datos de la Tabla 3.1 en la representación CEV'S se generan 19.72 MVARs, con este dato se determina el voltaje del nodo 4 (nodo de baja del transformador) que representa el voltaje en terminales del CEV y como se muestra a continuación corresponde con el dato de simulación presentado en la Tabla 3.1, de esa forma se demuestra que cumple con la característica de operación.

$$\Delta V = X_{pte} Q_{cev} = 0.05 * (-0.1972) = -0.00986$$

$$V4 = V_{ref} + \Delta V = 1.0 - 0.00986 = 0.9901$$

Para la representación del CEVR, en la cual se controla el voltaje en el nodo de alto voltaje, nodo 3 del sistema de prueba, para la misma característica del 5%, la generación de reactivos es de 22.26 MVARs, usando (3.2) se determina el voltaje del nodo 3, aquí el voltaje del nodo 4 siempre se mantiene en el valor nominal mediante el ajuste del voltaje del nodo 5 (V_{rem}), como se observa en la Tabla 3.1, se llega al mismo resultado probando que cumple con la característica.

$$\Delta V = X_{pte} Q_{cev} = 0.05 * (-0.2226) = -0.01113$$

$$V3 = V_{ref} + \Delta V = 1.0 - 0.01113 = 0.98887$$

Para mostrar que $I_{cev} \approx Q_{cev}$ se resuelve el sistema de prueba 1 mostrando los resultados de las iteraciones, determinando la corriente que circula entre los nodos 4 y 5 con los resultados presentados en las Tablas 3.3 y 3.4 en cada iteración, se comprueba que el resultado es aproximado a la potencia reactiva entre dichos nodos; también aquí se puede comprobar que se cumple con la pendiente en cada iteración usando (3.2).

Tabla 3.3 Resultados de la simulación completa aplicando CEVS para $X_{pte} = 0.03$.

| Nodos | Iteración 0 | | Iteración 1 | | Iteración 2 | |
|-------|-------------|---------|-------------|--------|-------------|---------|
| | V | Qgen | V | Qgen. | V | Qgen. |
| 1 | 1.0 | 0 | 1.0 | -0.186 | 1.0 | -0.1052 |
| 2 | 1.0 | -0.1761 | 1.0080 | 0.0741 | 1.0047 | 0.0003 |
| 3 | 1.0 | -0.1761 | 0.9897 | -0.240 | 0.9854 | -0.2997 |
| 4 | 1.0 | 0 | 0.9956 | 0 | 0.9937 | 0 |
| 5 | 1.0 | 0 | 1.0 | 0.1474 | 1.0 | 0.2091 |

Tabla 3.4 Resultados de la simulación completa aplicando CEVR para $X_{pte} = 0.03$.

| Nodos | Iteración 0 | | Iteración 1 | | Iteración 2 | | Iteración 3 | |
|-------|-------------|--------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
| | V | Qgen. | V | Qgen. | V | Qgen. | V | Qgen. |
| 1 | 1.0 | 0 | 1.0 | -0.2031 | 1.0 | -0.1359 | 1.0 | -0.1383 |
| 2 | 1.0 | -0.176 | 1.0086 | 0.0744 | 1.0060 | 0.0002 | 1.0061 | 0 |
| 3 | 1.0 | -0.176 | 0.9935 | -0.2399 | 0.9923 | -0.2999 | 0.9929 | -0.3 |
| 4 | 1.0 | 0 | 0.9984 | -0.1686 | 0.9993 | -0.0688 | 1.0 | -0.0001 |
| 5 | 1.0 | 0 | 1.0017 | 0.3324 | 1.0024 | 0.3051 | 1.0024 | 0.2386 |

Aplicando (3.2) se demuestra que $I_{cev} \approx Q_{cev}$ en ambas representaciones y en cada una de las iteraciones. Para los resultados de la Tabla 3.4 se determinó el coeficiente de sensibilidad con valor de -0.9649, para el ajuste de voltaje.

3.10 SISTEMA DE PRUEBA 2.

Un sistema con una configuración más compleja es el mostrado en la Figura 3.19, en el cual se mostrará el control remoto de voltaje mediante el ajuste del voltaje de referencia del Compensador Estático de Var's, donde el ajuste se realiza aplicando un coeficiente de sensibilidad.

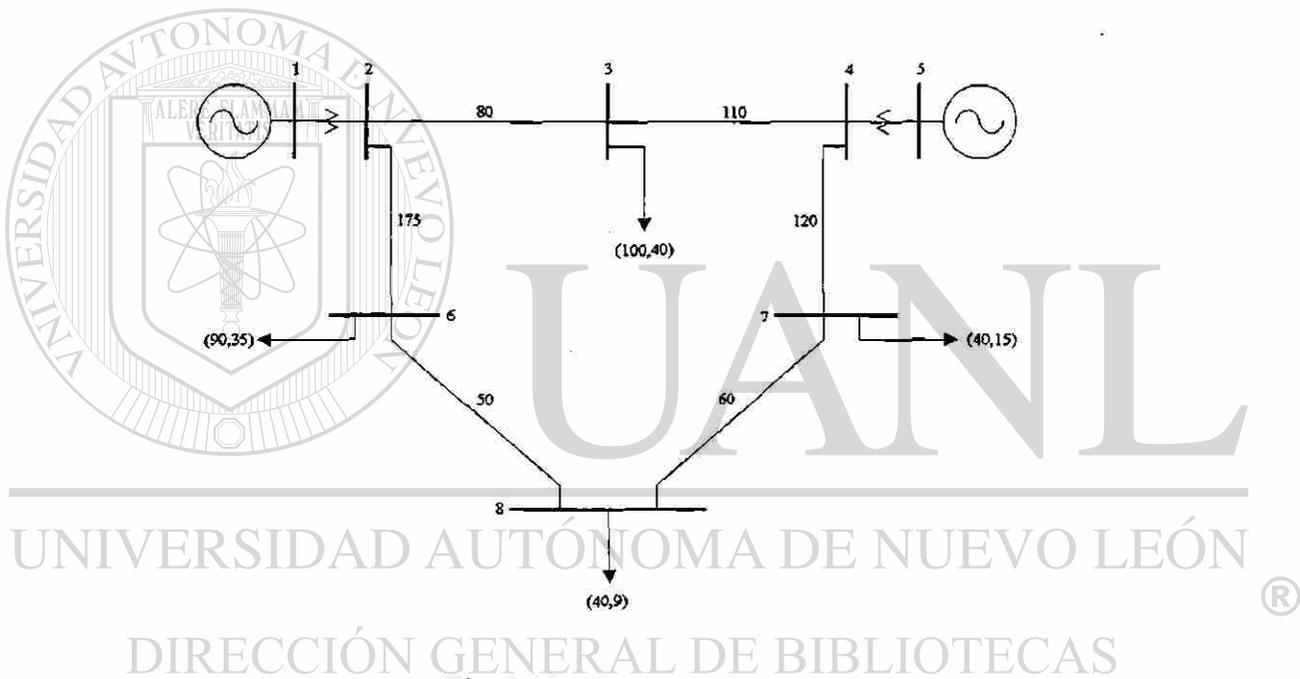


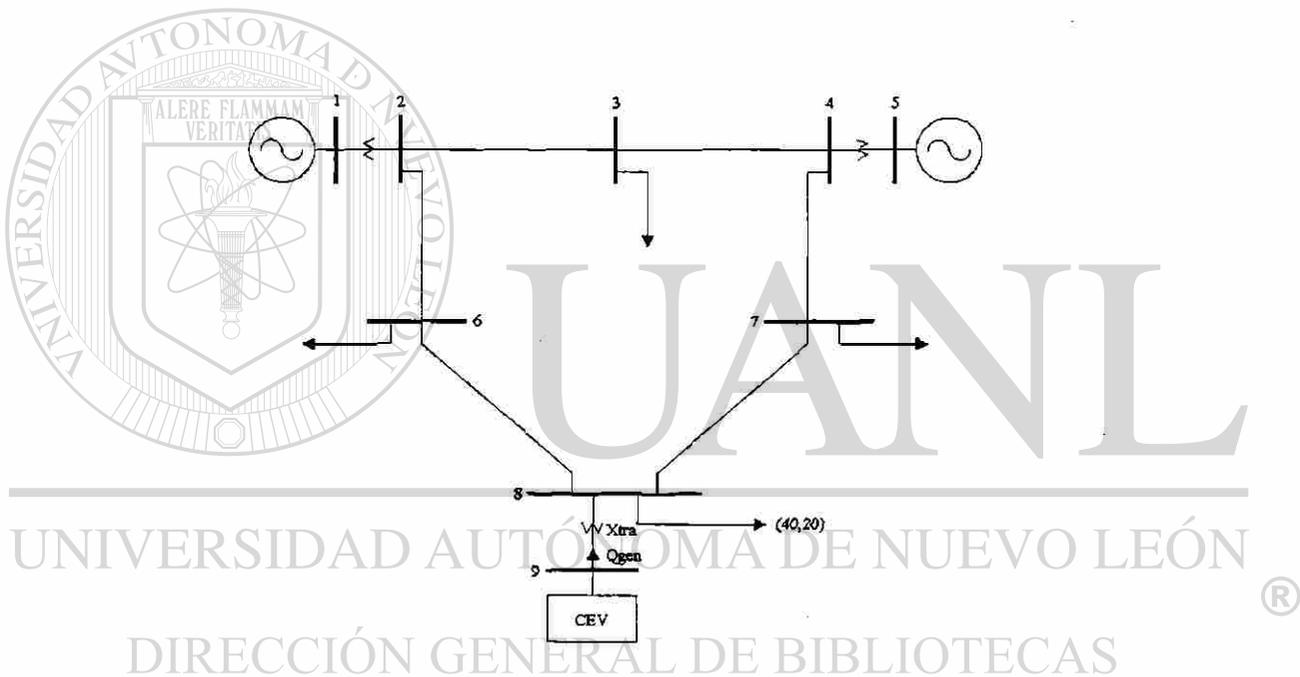
Fig. 3.19 Sistema de prueba 2.

Los datos del sistema (230 KV) son datos típicos para las longitudes indicadas y las demandas especificadas, ver Apéndice A para datos. En el caso base todos los nodos permanecen dentro del rango de voltaje especificado aceptable ($\Delta V = \pm 5 \%$), pero si se incrementa la demanda reactiva del nodo 8, de 9 MVARs a 20 MVARs, algunos nodos se salen del rango, formando el caso 1, de la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Resultados de las simulaciones del sistema de prueba 2.

| CASO | Iter. | V 1 | V 2 | V 3 | V 4 | V 5 | V 6 | V 7 | V 8 |
|--------|-------|-------|--------|--------|--------|-----|--------|--------|--------|
| BASE | 4 | 1.025 | 1.0068 | 0.9840 | 0.9962 | 1.0 | 0.9620 | 0.9706 | 0.9648 |
| CASO 1 | 4 | 1.025 | 1.0012 | 0.9780 | 0.9898 | 1.0 | 0.9413 | 0.9520 | 0.9411 |

Los resultados muestran que los voltajes de los nodos 6 y 8 están fuera del rango, es posible determinar la ubicación estratégica del CEV en el sistema, siendo el nodo 8 la mejor opción para su control, Figura 3.20.

**Fig. 3.20** Sistema de prueba 2 con la implementación del CEV.

Para controlar el voltaje de un nodo de carga, el CEV debe tener suficientes ramas capacitivas e inductivas de tal forma que no se pierda el control, de lo contrario el nodo pasa a ser un nodo de carga y se pierde el control de voltaje.

La Tabla 3.6 presenta resultados de simulaciones para el control remoto de voltaje en los nodos 8, 7 y 6 con pendiente plana y polarizada para el sistema de la Figura 3.20.

Tabla 3.6 Resultados del control remoto de voltaje con la aplicación de CEV's al sistema de prueba 2.

| | Magnitudes de Voltajes Nodales (p.u.) | | | | | |
|-------|---------------------------------------|-----------|----------|--|-----------|----------|
| | Característica Plana Xpte = 0 | | | Característica Polarizada Xpte = 0.01 | | |
| | Nodo 8 | Nodo 7 | Nodo 6 | Nodo 8 | Nodo 7 | Nodo 6 |
| V1 | 1.0250 | 1.0250 | 1.0250 | 1.0250 | 1.0250 | 1.0250 |
| V2 | 1.0159 | 1.0168 | 1.0184 | 1.0149 | 1.0156 | 1.0167 |
| V3 | 0.9938 | 0.9947 | 0.9964 | 0.9927 | 0.9934 | 0.9946 |
| V4 | 1.0056 | 1.0064 | 1.0082 | 1.0045 | 1.0052 | 1.0063 |
| V5 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| V6 | 0.9919 | 0.9947 | 1.0002 | 0.9884 | 0.9908 | 0.9944 |
| V7 | 0.9972 | 0.9998 | 1.0048 | 0.9942 | 0.9963 | 0.9995 |
| V8 | 1.0001 | 1.0035 | 1.0099 | 0.9961 | 0.9989 | 1.0031 |
| Vref | 1.0233 | 1.0286 | 1.0367 | 1.0179 | 1.0218 | 1.0277 |
| Iter. | 4 | 5 | 4 | 4 | 6 | 4 |
| Qgen. | 41.1260 | 44.8683 | 48.2363 | 38.5138 | 40.6442 | 43.8577 |
| Skm | -0.7015 | -0.536252 | -0.59325 | -0.7015 | -0.536252 | -0.59325 |

De los resultados de la Tabla 3.6 se debe observar el impacto en la magnitud de los voltajes nodales al controlar el voltaje en un punto del sistema aplicando un CEV con y sin pendiente y la potencia reactiva generada. El análisis de los resultados indican que para controlar a un voltaje con característica de operación plana se requiere generar más reactivos, dicho de otra forma se requiere conectar más ramas capacitivas, que si se controla con característica de operación polarizada. En el control de voltaje influyen dos parámetros importantes: la distancia eléctrica y la magnitud de la carga. En este sistema de prueba la magnitud de la carga predomina sobre el efecto de la distancia eléctrica, por lo que para controlar el voltaje del nodo 6 (nodo más cercano eléctricamente) se requiere generar más reactivos que para controlar el voltaje del nodo 7 (nodo más alejado eléctricamente).

De los resultados analizados, generalmente en el control de voltaje con característica de operación polarizada se realizan más iteraciones que con característica de operación plana debido a que el voltaje depende de la inyección de reactivos. Se observa que el voltaje de referencia (V_{ref} = Voltaje de nodo 9) se ajusta a un valor mayor si la magnitud de la carga es más grande, con esta acción de control se observa un aumento de voltaje en los nodos intermedios.

La Tabla 3.7 muestra resultados de las magnitudes de voltajes nodales obtenidos al utilizar un CEV o un CEVR para controlar el voltaje del nodo 8 (Figura 3.20) y se presentan violaciones en los límites de reactivos (± 20 MVARs), se analizan los dos modelos implementados en el estudio de flujos de potencia; como un nodo de carga (PQ) con $P = 0$ y Q de acuerdo al límite violado o como un elemento en derivación capacitivo o inductivo.

Tabla 3.7 Resultados de las simulaciones al violar uno de los límites del CEV o del CEVR.

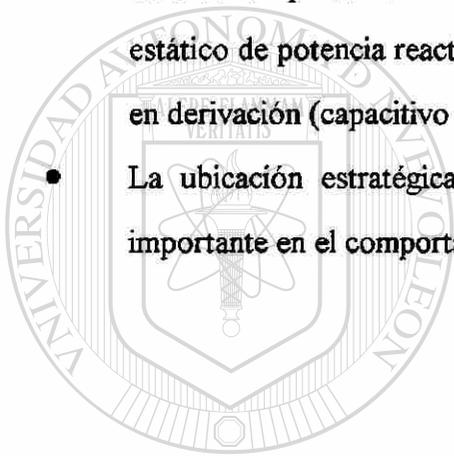
| | Magnitudes de Voltajes Nodales (p.u.) | | | |
|-------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | CEV'S | | CEVR | |
| | Nodo Carga PQ (P=0) | Elemento en derivación | Nodo de Carga PQ (P=0) | Elemento en derivación |
| V1 | 1.0250 | 1.0250 | 1.0250 | 1.0250 |
| V2 | 0.9942 | 1.0012 | 0.9942 | 1.0014 |
| V3 | 0.9705 | 0.9781 | 0.9706 | 0.9782 |
| V4 | 0.9823 | 0.9898 | 0.9824 | 0.9900 |
| V5 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| V6 | 0.9174 | 0.9415 | 0.9175 | 0.9420 |
| V7 | 0.9305 | 0.9521 | 0.9307 | 0.9526 |
| V8 | 0.9133 | 0.9413 | 0.9135 | 0.9419 |
| V9 | 0.9024 | 0.9414 | 0.9041 | 0.9422 |
| V10 | 0.8929 | 0.9414 | 0.9026 | 0.9423 |
| Iter. | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Qgen | -16.9205 | 0.1110 | -16.9916 | 0.5182 |

De los resultados de la Tabla 3.7 se debe observar el impacto en las magnitudes de los voltajes nodales, al modelar el CEV o el CEVR como un nodo de carga PQ o como un elemento en derivación. Se puede observar que es mejor liberar el control de voltaje del CEV o del CEVR como un elemento en derivación, debido a que proporciona magnitudes de voltajes nodales no tan deprimidos.

3.11 CONCLUSIONES.

- El control de voltaje en un sistema eléctrico de potencia depende de la utilización coordinada de las fuentes de potencia reactiva disponibles, como son; generadores, condensadores síncronos, compensadores estáticos de var's y elementos reactivos en derivación.
- En un estudio de flujos de potencia convencional se utilizan nodos de voltaje controlado, donde de alguna forma se varía la potencia reactiva de la fuente para mantener el voltaje en un valor especificado, se considera que la magnitud del voltaje se mantiene constante independientemente de la generación de potencia reactiva.
- Mediante la utilización de compensadores estáticos de var's es posible controlar el voltaje en el punto donde se inyecta la potencia reactiva (control local) o en un punto remoto del sistema de potencia.
- El control de voltaje mediante CEV's se puede realizar con una característica de operación plana o polarizada, en este último caso el voltaje a controlar variará dependiendo de la inyección reactiva.
- Al utilizar un control de voltaje con característica plana hay mayores requerimientos de potencia reactiva que con una característica polarizada, con lo cual se disminuye la reserva de potencia reactiva.

- En el control remoto de voltaje es necesario modificar el voltaje de referencia, utilizando un coeficiente de sensibilidad que relacione los cambios de voltaje en el nodo a controlar con los cambios del voltaje de referencia.
- El número de iteraciones en los sistemas de prueba analizados fue de 2-3 para control local y de 3-6 para el control remoto.
- En las pruebas realizadas con el control de voltaje remoto, se presenta una convergencia más lenta con la característica polarizada que con característica plana.
- Cuando se presentan violaciones en los límites de reactivos de un compensador estático de potencia reactiva, es recomendable representar el CEV como un elemento en derivación (capacitivo o inductivo).
- La ubicación estratégica de la compensación estática reactiva influye de forma importante en el comportamiento del voltaje a nivel sistema.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Capítulo 4

MODELADO DEL TRANSFORMADOR DEFASADOR EN ESTUDIOS DE FLUJOS

4.1 INTRODUCCION.

En el sistema eléctrico de potencia la distribución de flujos se realiza de acuerdo a las impedancias del sistema de transmisión y a la localización de la carga, por lo que es posible tener elementos sobrecargados en el sistema, aún cuando existan trayectorias alternas libres y con capacidad para ser utilizadas. En la operación de la red de transmisión se deberán supervisar continuamente los límites operativos de los flujos de potencia para garantizar una operación segura ante la ocurrencia de contingencias [34, 38].

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Los principales medios de control que afectan el flujo de potencia activa y que permiten regular dicho flujo son: los cambios de generación, los transformadores defasadores, y los bancos controlados de capacitores serie [34].

En el análisis convencional de flujos de potencia generalmente no se tiene control del flujo de potencia activa en sus elementos [22]. A través del transformador defasador es posible lograr el control del flujo de potencia activa mediante ajustes de los ángulos de fase de los voltajes nodales correspondientes.

El ajuste del ángulo de fase se logra dando un pequeño incremento de voltaje (ΔV) en cuadratura al voltaje del sistema, esto da como resultado un ajuste ($\Delta\theta$) en la fase de dicho voltaje y a su vez el ajuste en el flujo de potencia activa. En la Figura 4.1 se muestra la conexión de un transformador defasador, y en la Figura 4.2 se muestra su diagrama fasorial; se indica la forma en la que ocurre el ajuste en el ángulo de fase, se puede ver que para pequeños cambio de fase la magnitud del voltaje prácticamente no se ve afectada [34, 37, 39].

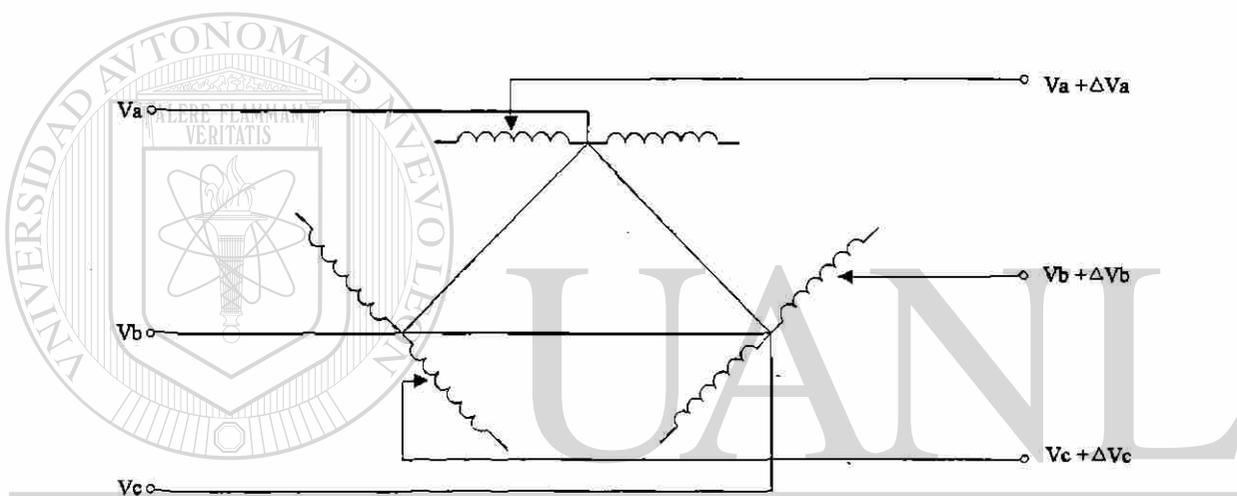


Fig. 4.1 Conexión de un transformador defasador.

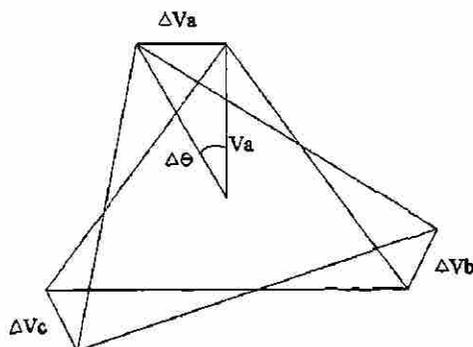


Fig. 4.2 Diagrama fasorial del transformador de la Figura 4.1.

La forma más efectiva para controlar la componente en cuadratura es mediante tiristores de alta potencia cuya ventaja es la rapidez de ajuste y en forma continua para lograr un cambio preestablecido en el flujo de potencia activa [48].

El análisis de esta sección se realiza utilizando el método de corriente directa, permite visualizar en forma clara el comportamiento del modelado de elementos del sistema y su implementación en el método de Newton-Raphson [22, 37, 46].

4.2 ANALISIS DE LA TRANSFERENCIA DE POTENCIA.

La potencia activa transmitida en una línea del sistema eléctrico de potencia se define en forma general, por la siguiente expresión simplificada.

$$P_{pq} = \frac{V_p V_q \sin(\delta_p - \delta_q)}{x_{pq}} \quad (4.1)$$

Al aplicar el transformador defasador en la línea su efecto se observa en el ángulo de fase del voltaje, en este caso del nodo p , como se ilustra en la Figura 4.3.

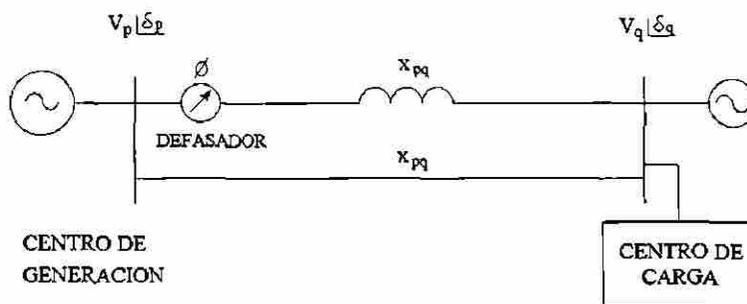


Fig. 4.3 Aplicación del Transformador Defasador en la línea de transmisión.

Con la inclusión del transformador defasador en la línea de transmisión, la expresión simplificada para determinar el flujo de potencia [38] es:

$$P_{pq} = \frac{((\delta_p + \phi) - \delta_q)}{x_{pq}} \quad (4.2)$$

En general, se puede observar que para transmitir más flujo de potencia el ángulo de defasamiento ϕ debe aumentar y para disminuir el flujo de potencia éste debe disminuir.

En las expresiones (4.1) y (4.2) se supone que las magnitudes de voltaje en los nodos extremos se mantienen en su valor nominal y la reactancia de la línea permanece constante.

4.3 MODELADO DEL TRANSFORMADOR.

Para obtener los elementos del modelo matricial se utiliza el diagrama unifilar de la Figura 4.4 que representa únicamente la red de secuencia positiva ya que el sistema eléctrico de potencia se considera balanceado [38, 42].

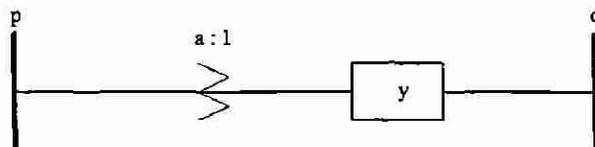


Fig. 4.4 Diagrama unifilar del transformador con admitancia en lado de baja.

Del diagrama unifilar de la Figura 4.4 se obtiene la matriz de admitancias nodal utilizando el principio de superposición, considerando la relación de transformación compleja.

$$a = |a| \angle \phi \quad (4.3)$$

Donde $|a|$ es la relación de magnitudes de voltaje y ϕ es el defasamiento obtenido con el transformador, la ecuación matricial nodal que se obtiene es :

$$\begin{pmatrix} I_p \\ I_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{y}{|a|^2} & -\frac{y \angle \phi}{|a|} \\ -\frac{y \angle -\phi}{|a|} & y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_p \\ V_q \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

El defasamiento del transformador origina que la matriz de admitancias no sea simétrica, dada por (4.4), la cual es base para determinar el flujo de potencia activa por el transformador [38], de la forma siguiente :

$$P_{pq} = \text{Re} \{ V_p I_{pq}^* \}$$

$$P_{pq} = \text{Re} \left\{ V_p \left(\frac{y^*}{|a|^2} V_p^* - \frac{y^* \angle -\phi}{|a|} V_q^* \right) \right\} \quad (4.5)$$

$$P_{qp} = \text{Re} \left\{ V_q \left(-\frac{y^* \angle \phi}{|a|} V_p^* + y^* V_q^* \right) \right\}$$

Desarrollando (4.5) y utilizando las componentes real e imaginaria de la admitancia ($g + jb$) se obtiene la expresión para la potencia activa:

$$P_{pq} = \frac{|V_p|^2}{|a|^2} g - \frac{|V_p V_q|}{|a|} \left[(g \cos \phi - b \sin \phi) \cos \delta_{pq} - (-b \cos \phi - g \sin \phi) \sin \delta_{pq} \right] \quad (4.6)$$

$$P_{qp} = |V_q|^2 g - \frac{|V_p V_q|}{|a|} \left[(g \cos \phi + b \sin \phi) \cos \delta_{pq} - (g \sin \phi - b \cos \phi) \sin \delta_{pq} \right]$$

donde los términos dominantes son:

$$P_{pq}^d = -\frac{|V_p V_q|}{|a|} b \cos \phi \operatorname{Sen} \delta_{pq} + \frac{|V_p V_q|}{|a|} b \operatorname{Sen} \phi \operatorname{Cos} \delta_{pq} \quad (4.7)$$

$$P_{qp}^d = -\frac{|V_q V_p|}{|a|} b \cos \phi \operatorname{Sen} \delta_{qp} - \frac{|V_q V_p|}{|a|} b \operatorname{Sen} \phi \operatorname{Cos} \delta_{qp}$$

Para el flujo de potencia reactiva se obtiene:

$$Q_{pq} = -\frac{|V_p|^2}{|a|^2} b - \frac{|V_p V_q|}{|a|} \left[(g \cos \phi - b \operatorname{Sen} \phi) \operatorname{Sen} \delta_{pq} + (-b \cos \phi - g \operatorname{Sen} \phi) \operatorname{Cos} \delta_{pq} \right] \quad (4.8)$$

$$Q_{qp} = -|V_q|^2 b - \frac{|V_q V_p|}{|a|} \left[(g \cos \phi + b \operatorname{Sen} \phi) \operatorname{Sen} \delta_{qp} + (g \operatorname{Sen} \phi - b \cos \phi) \operatorname{Cos} \delta_{qp} \right]$$

donde los términos dominantes son:

$$Q_{pq}^d = -\frac{|V_p|^2}{|a|^2} b + \frac{|V_p V_q|}{|a|} b \cos \phi \operatorname{Cos} \delta_{pq} \quad (4.9)$$

$$Q_{qp}^d = -|V_q|^2 b + \frac{|V_q V_p|}{|a|} b \cos \phi \operatorname{Cos} \delta_{qp}$$

Las inyecciones equivalentes descritas por (4.6) y (4.8) son función de voltajes nodales V_p y V_q y del defasamiento. Se puede observar de (4.7) que el defasamiento influye significativamente en el cálculo de la potencia activa, si no existe defasamiento ($\phi = 0$) los

dos segundos términos son iguales a cero. Un valor aproximado de estos términos es $b_{pq}\phi$ o bien en forma de reactancia ($-\phi / X_{pq}$), el cual está en función directa del defasamiento a partir del cual se puede redistribuir el flujo de potencia. Generalmente el flujo de potencia activa es modificado mediante el cambio de generación o la conexión / desconexión de líneas, sin embargo, estos medios tienen restricciones económicas y de operación. Con el uso del transformador defasador se controla el flujo de potencia activa sin afectar la economía ni la configuración del sistema [38].

4.4 INCLUSION DEL MODELO DEL TRANSFORMADOR DEFASADOR EN FLUJOS DE POTENCIA.

Las ecuaciones a resolver iterativamente por el método de Newton-Raphson [46] son:

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H & N \\ J & L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V/V \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

La estructura de la matriz de admitancias generalmente es simétrica, si se incluye el modelo del transformador defasador tiene forma asimétrica, por lo tanto la matriz Jacobiana resulta no simétrica degradando la eficiencia de la solución, teniendo que realizar más operaciones por el hecho de trabajar con la matriz de admitancias completa.

Para evitar lo anterior, y seguir manteniendo la estructura simétrica (como si no existiera el transformador defasador) de la matriz de admitancias, se representa el efecto del defasamiento en el término independiente (ΔP), con lo cual se reduce a evaluar los términos independientes de (4.10) en forma exacta [38].

La aplicación del transformador defasador permite controlar el flujo de potencia activa a valores preestablecidos en una línea del sistema o enlace de interconexión, tanto en la línea donde se encuentra el transformador defasador (Control Local) como en otra diferente (Control Remoto); esto se puede lograr con la utilización de un coeficiente de sensibilidad que relacione los cambios en el flujo de potencia activa (ΔP_{pq}) de la línea que se desea controlar, debido a cambios en el ángulo de defasamiento ($\Delta\phi$). El efecto del transformador defasador es modelado por inyecciones equivalentes en los nodos extremos, el ajuste se realiza a través de errores de retroalimentación, donde la ganancia es igual a la sensibilidad entre el ángulo de fase y el flujo de potencia [34, 38].

El efecto del defasamiento sobre los ángulos de fase nodales de los voltajes **p** y **q** es obtenido por inyecciones equivalentes de acuerdo con (4.11) que es función de la potencia activa de la línea especificada y calculada [34].

$$\Delta\phi = \frac{(P_{pq}^{esp} - P_{pq}^{cal}) X_{pq}}{S_{pq}} \quad (4.11)$$

donde:

P_{pq}^{esp} Potencia activa especificada en la línea **p-q**.

P_{pq}^{cal} Potencia activa de la línea **p-q** calculada en cada iteración.

X_{pq} Reactancia del transformador defasador.

S_{pq} Coeficiente de sensibilidad que relaciona $\left(\frac{\Delta\delta_{pq}}{\Delta\phi} \right)$

El flujo de potencia activa en la línea **p-q**, calculado en cada iteración, está en función de las magnitudes de los voltajes V_p y V_q y también del defasamiento ϕ , dado por (4.12).

$$P_{pq}^{cal} = \frac{|V_p|^2}{|a|^2} g - \frac{|V_p V_q|}{|a|} [(g \cos \phi - b \sin \phi) \cos \delta_{pq} - (-b \cos \phi - g \sin \phi) \sin \delta_{pq}] \quad (4.12)$$

El coeficiente de sensibilidad en forma general se puede determinar por la siguiente expresión:

$$S_{pq} = -M^t [J]^{-1} N_{pq} + 1 \quad (4.13)$$

donde : M^t Vector disperso con +1 y -1 en las posiciones p y q respectivamente.

N_{pq} Vector disperso con $+1/X_{pq}$ y $-1/X_{pq}$ en las posiciones p y q respectivamente.

J Jacobiano calculado en cada iteración del método de Newton-Raphson.

Para satisfacer la condición adicional de control de potencia activa, el defasamiento ϕ es actualizado en cada iteración de acuerdo con (4.14) [34].

$$\phi^{k+1} = \phi^k + \Delta \phi^k \quad (4.14)$$

En la Figura 4.5 se muestra un diagrama de flujo del método de Newton-Raphson modificado con la implementación del transformador defasador para control de la potencia activa. Esta forma de implementar el modelo del transformador defasador no cambia el algoritmo original, sin embargo, los ajustes y cambios para controlar la potencia activa provocan que la solución se obtenga en un número mayor de iteraciones.

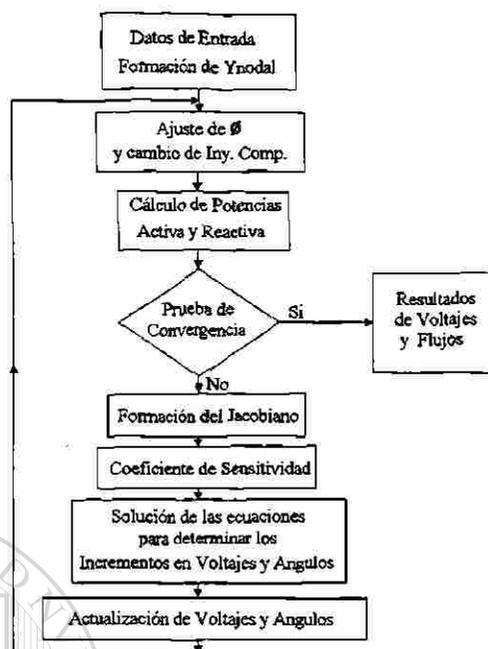


Fig. 4.5 Diagrama de flujo de N-R modificado con la implementación del Transformador Defasador.

La solución del algoritmo consiste en que antes de cada iteración se ajusta el defasamiento con el coeficiente de sensibilidad, el cual altera las inyecciones de potencia. Para la potencia especificada en la línea y los desbalances de potencias nodales se puede utilizar la misma prueba de convergencia o una diferente.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Cuando el transformador defasador se implementa en el método Desacoplado o el Desacoplado Rápido se recomienda la aplicación de factores de aceleración α apropiados ($1 < \alpha < 2$) en el cálculo del defasamiento, de acuerdo con (4.15); logrando reducir número de iteraciones.

$$\phi^{k+1} = \phi^k + \alpha \Delta\phi^k \quad (4.15)$$

4.5 CONTROL DE POTENCIA ACTIVA EN ENLACES.

Para analizar el control de potencia activa en enlaces de transmisión con la inclusión del transformador defasador [38], se utiliza el sistema elemental de la Figura 4.6

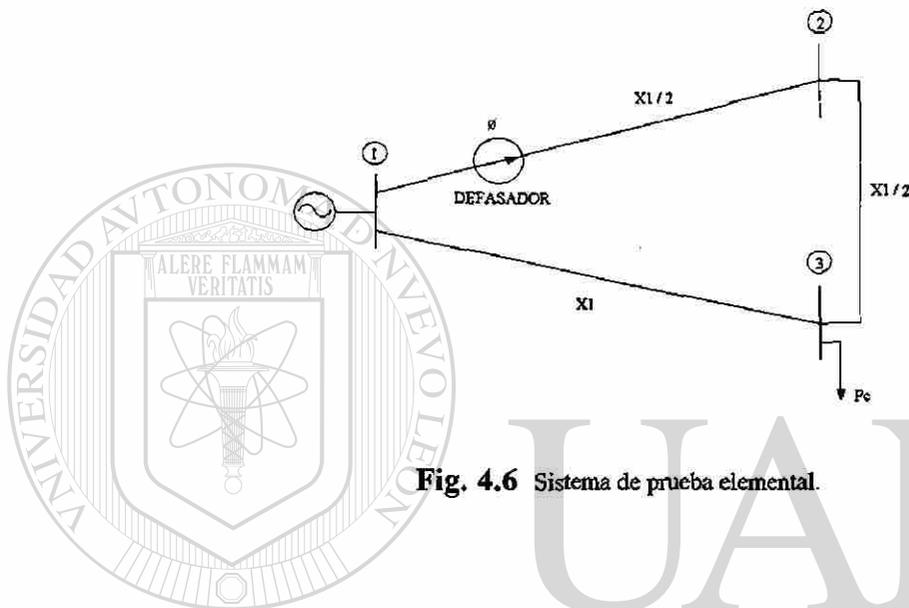


Fig. 4.6 Sistema de prueba elemental.

El nodo 1 es tomado como referencia (nodo compensador). Un análisis ilustrativo empleando el método de corriente directa muestra en una forma clara cómo impacta el defasamiento en la distribución de potencia activa [38].

Del análisis nodal del sistema se pueden obtener (4.16) y (4.17), únicamente para la potencia activa.

Para el nodo 2.

$$\frac{\delta_2 - \phi}{\frac{x_1}{2}} + \frac{\delta_2 - \delta_3}{\frac{x_1}{2}} = 0 \quad (4.16)$$

Para el nodo 3.

$$\frac{\delta_3 - \delta_1}{x_1} + \frac{\delta_3 - \delta_2}{\frac{x_1}{2}} = -P_c \quad (4.17)$$

Despejando los términos que contienen el ángulo de defasamiento al segundo miembro, resulta :

$$\begin{pmatrix} \frac{4}{x_1} & -\frac{2}{x_1} \\ -\frac{2}{x_1} & \frac{3}{x_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_2 \\ \delta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2\phi}{x_1} \\ -P_c \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

Se observa de (4.18) que la matriz de coeficientes sigue siendo simétrica y que el defasamiento ϕ afecta el término independiente o de control del nodo 2, el cual simula una carga de valor $\frac{2\phi}{x_1}$ para forzar el flujo de potencia activa por la línea.

En cada una de las áreas se tiene control sobre el intercambio de potencia activa, sin embargo, en las líneas de enlace no se controla el flujo de potencia activa, existiendo la posibilidad de que una de las líneas esté sobrecargada o que el intercambio neto de flujo sea cero, teniendo con esto, una subutilización del enlace de transmisión y un incremento de pérdidas en el sistema. Es posible con la aplicación de un transformador defasador controlar el flujo de potencia en el enlace de transmisión, alterando los patrones naturales del flujo de potencia, y así utilizar a su capacidad el sistema de transmisión [45].

Al modificar el defasamiento en cada iteración se modifica también el ángulo del nodo 2 y del nodo 3. La proporción en la que varían define el efecto del defasamiento. Haciendo uso del método de corriente directa, el flujo de potencia activa de 1 a 2 se obtiene de la forma siguiente :

$$P_{12} = \frac{(\delta_1 + \phi) - \delta_2}{\frac{x_1}{2}} \quad (4.19)$$

Ahora el coeficiente de sensibilidad que relaciona cambios en el flujo P_{12} debido a cambios en el defasamiento se obtiene derivando (4.19) con respecto al defasamiento, esto es :

$$\frac{\partial P_{12}}{\partial \phi} = \frac{1 - \frac{\partial \delta_2}{\partial \phi}}{\frac{x_1}{2}} \quad (4.20)$$

La efectividad del cambio en el ángulo de fase depende directamente del coeficiente que mide el cambio en el ángulo del nodo 2 al cambiar el defasamiento $\frac{\partial \delta_2}{\partial \phi}$. Presentándose

dos situaciones:

- i) Si el coeficiente es unitario, no será posible controlar el flujo de potencia al cambiar el ángulo ϕ .

$$\frac{\partial P_{12}}{\partial \phi} = 0$$

- ii) Si el coeficiente de sensibilidad es cero, el flujo de potencia activa dependerá directamente del ángulo de defasamiento.

$$\frac{\partial P_{12}}{\partial \phi} = \frac{1}{\frac{x_1}{2}}$$

Normalmente el coeficiente $\frac{\partial \delta_2}{\partial \phi}$ se encuentra entre cero y uno.

Para controlar la potencia activa en valores preestablecidos es necesario determinar coeficientes de sensibilidad, que en este caso particular se calculan derivando (4.18) con respecto a ϕ .

$$\begin{pmatrix} \frac{4}{x_1} & -\frac{2}{x_1} \\ \frac{2}{x_1} & \frac{3}{x_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial \delta_2}{\partial \phi} \\ \frac{\partial \delta_3}{\partial \phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{x_1} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

Los cambios en el flujo de potencia para un defasamiento dado se obtendrán a partir de este coeficiente, el cual es importante que se obtenga en forma exacta para lograr los cambios deseados.

$$\Delta P_{12} = \frac{\partial P_{12}}{\partial \phi} \Delta \phi \quad (4.22)$$

En forma inversa, el cambio en el defasamiento para lograr algún nivel de flujo de potencia, se calcula mediante:

$$\Delta \phi = \frac{\Delta P_{12}}{\frac{\partial P_{12}}{\partial \phi}} \quad (4.23)$$

De (4.21) se puede ver que los coeficientes de sensibilidad están en función de las distancias eléctricas a los puntos con ángulos de fase controlados [38].

4.6 SISTEMA DE PRUEBA 1.

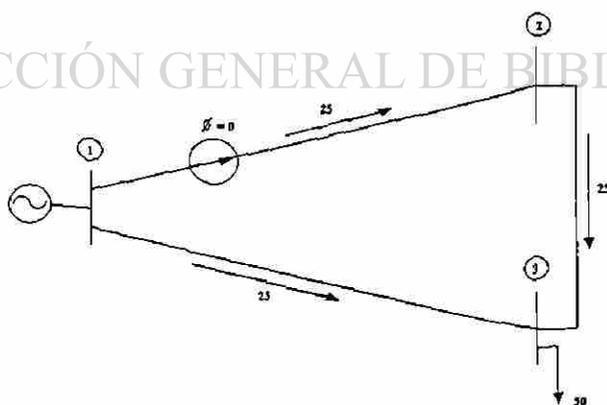
Para probar la inclusión del modelo del transformador defasador en estudios de flujos de potencia se considera el sistema elemental de la Figura 4.6, para una demanda de 0.5 p.u. y una reactancia x_1 de 0.2 p.u.

Los resultados del estudio de flujos para diferentes valores de ángulo de defasamiento se muestran en la Tabla 4.1, el transformador defasador es aplicado en la línea 1-2 y se usa una tolerancia de 1 MW. De los resultados se observa que al aumentar el ángulo de defasamiento los ángulos de los nodos 2 y 3 también aumentan, con lo cual se aumenta la potencia transmitida por la línea; en tanto, que al disminuir el ángulo de defasamiento ocurre lo contrario. Estos resultados fueron obtenidos mediante estudios de flujos de potencia para determinados grados de defasamiento, la solución se obtiene en las iteraciones indicadas.

Tabla 4.1 Resultados del efecto del transformador defasador en línea 1-2 sobre la potencia activa.

| ϕ (Grad) | δ_2 (Grad) | δ_3 (Grad) | P_{12} (MW) | P_{13} (MW) | P_{23} (MW) | Iter. |
|---------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|-------|
| 10 | 6.1285 | 2.1415 | 68.55 | -18.55 | 68.55 | 3 |
| 8 | 4.5970 | 1.1343 | 59.85 | -9.85 | 59.85 | 3 |
| 6 | 3.0794 | 0.1317 | 51.14 | -1.14 | 51.14 | 3 |
| 4 | 1.5711 | -0.8683 | 42.44 | 7.56 | 42.4 | 3 |
| 2 | 0.0676 | -1.8648 | 33.72 | 16.27 | 33.72 | 2 |
| 0 | -1.4324 | -2.8648 | 25.00 | 25.00 | 25.00 | 2 |
| -2 | -2.9389 | -3.8750 | 16.28 | 33.72 | 16.28 | 3 |
| -4 | -4.4512 | -4.8866 | 7.55 | 42.45 | 7.55 | 3 |
| -6 | -5.9750 | -5.9066 | -1.18 | 51.18 | -1.18 | 3 |
| -8 | -7.5147 | -6.9373 | -9.91 | 59.91 | -9.91 | 3 |
| -10 | -9.0748 | -7.9812 | -18.65 | 68.64 | -18.65 | 3 |

En las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se muestra la distribución de flujos en el sistema de prueba elemental.

**Fig. 4.7** Distribución de flujo de potencia activa para $\phi = 0^\circ$.

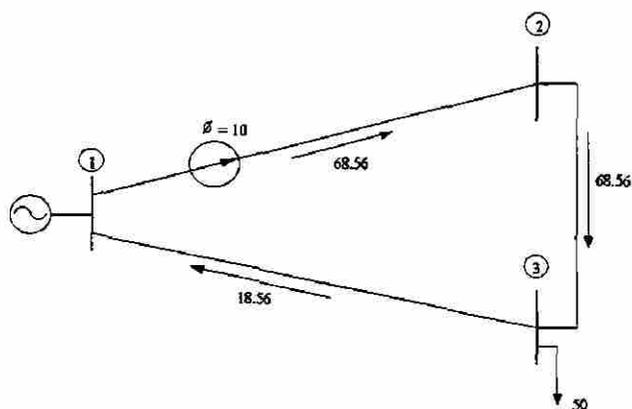


Fig. 4.8 Distribución de flujo de potencia activa para $\phi = 10^\circ$.

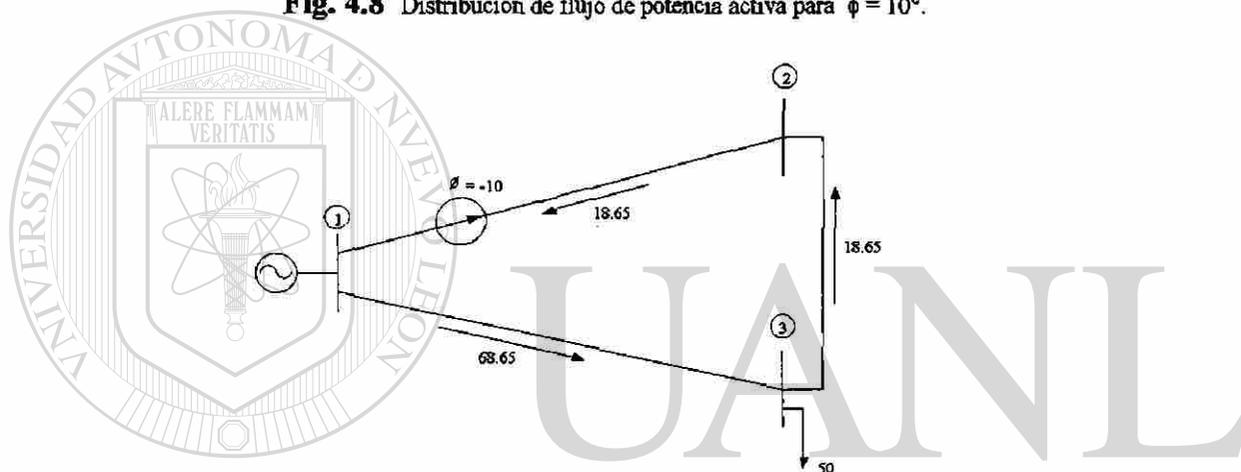


Fig. 4.9 Distribución de flujo de potencia activa para $\phi = -10^\circ$.

En las Figuras 4.8 y 4.9 se muestran los casos extremos para un ángulo de defasamiento de $+10$ y -10 grados respectivamente; en el caso de tener un defasamiento positivo se observa un aumento en la potencia transmitida por la línea 1-2. Cuando el defasamiento es negativo el flujo de potencia se invierte. Esta es la flexibilidad que un transformador defasador ofrece para el control de potencia activa.

En la Figura 4.10 se presentan tres características del comportamiento de la potencia activa al cambiar el ángulo de defasamiento en la línea 1-2 del sistema de prueba 1.

El parámetro que se varió en cada una de las características es la reactancia de las líneas del sistema de prueba 1.

- Para la característica (A) con reactancia $x_{12} = 0.1$, $x_{23} = 0.1$ y $x_{13} = 0.2$.
- Para la característica (B) con reactancia $x_{12} = 0.1$, $x_{23} = 0.1$ y $x_{13} = 0.6$.
- Para la característica (C) con reactancia $x_{12} = 0.3$, $x_{23} = 0.3$ y $x_{13} = 0.2$.

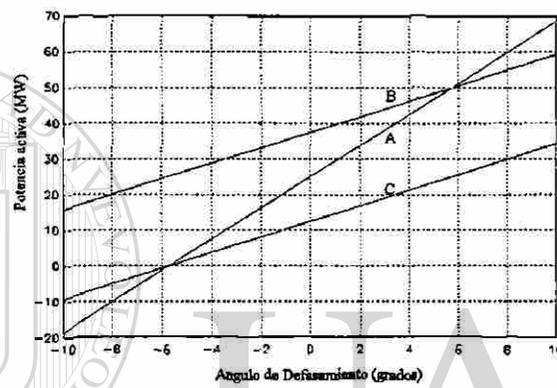


Fig. 4.10 Comportamiento de la potencia activa al variar el defasamiento.

Se observa que la mejor opción para tener un mayor rango en el control del flujo de potencia, se logra cuando la reactancia del nodo de voltaje controlado al punto de carga es la misma (Característica A). A medida que la reactancia de una de las líneas es más grande la pendiente de la característica disminuye, lo que indica que un cambio grande en el defasamiento provocará poco cambio en el flujo de potencia activa, por lo tanto, en esta situación no es atractiva la aplicación del transformador defasador.

La aplicación del transformador defasador en enlaces de transmisión es muy útil para controlar el flujo de potencia activa en los valores especificados entre las áreas. Cuando existen diferentes líneas en el enlace y con diferente nivel de voltaje, en algunas se tendrán

problemas de sobrecargas; con la aplicación del transformador defasador es posible disminuir o eliminar dichas sobrecargas.

La Tabla 4.2 presenta los resultados de controlar los flujos de potencia activa en las líneas de transmisión en diferentes valores especificados, se incluye el cambio en el ángulo de defasamiento para controlar el flujo y el número de iteraciones.

Tabla 4.2 Resultados del control de flujo a valores preestablecidos en enlaces.

| LINEAS | CASO BASE | $P_{12} = 20 \text{ MW}$ | $P_{12} = 30 \text{ MW}$ | $P_{12} = 40 \text{ MW}$ |
|-----------------|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1-2 | 25.0000 | 20.0053 | 30.0006 | 40.0190 |
| 2-3 | 25.0000 | 20.0053 | 30.0006 | 40.0190 |
| 1-3 | 25.0000 | 29.9953 | 19.9970 | 9.9810 |
| Iteraciones | 2 | 3 | 3 | 4 |
| ϕ (grados) | 0 | -1.1479 | 1.1478 | 3.4484 |

La Figura 4.11 muestra la convergencia del método de Newton-Raphson para controlar el flujo de potencia activa en la línea 1-2 a un valor de 40 MW. Se puede observar que prácticamente en dos iteraciones se llega al resultado.

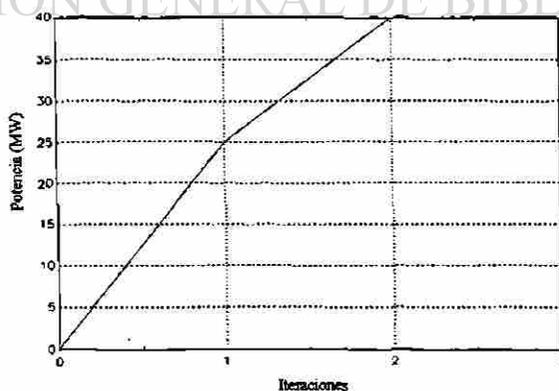


Fig. 4.11 Convergencia para controlar el flujo de potencia activa en un valor especificado.

4.7 SISTEMA DE PRUEBA 2.

En la Figura 4.12 se presenta el sistema de prueba 2, se incluyen los datos de parámetros de líneas y demandas. Este sistema es usado para evaluar el control local y remoto del flujo de potencia activa.

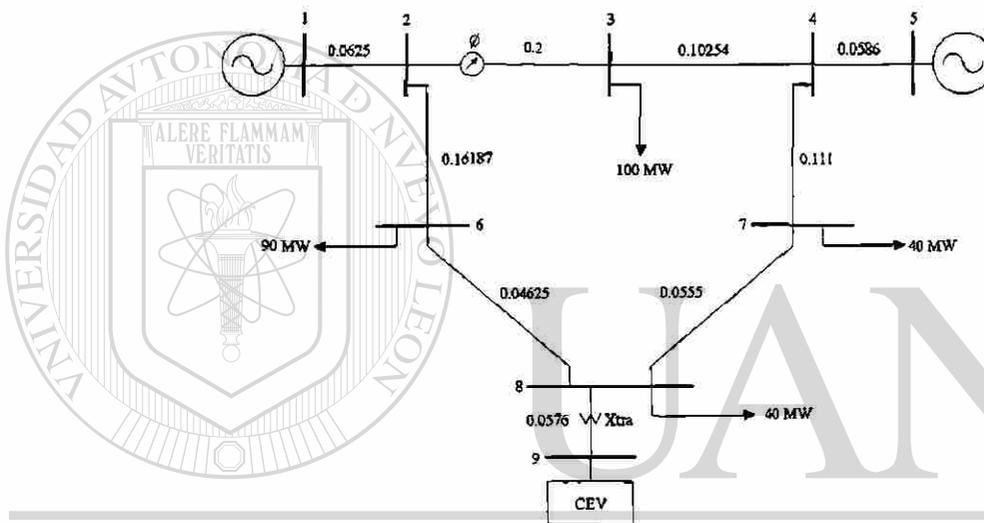


Fig. 4.12 Sistema de prueba 2.

El control local de potencia activa se refiere a controlar el flujo de potencia activa en la línea donde se encuentra instalado el transformador defasador, por ejemplo, controlar el flujo de potencia activa en la línea $p-q$, por medio de un transformador defasador instalado en la línea $p-q$. Mientras que el control remoto de potencia activa se refiere a controlar el flujo de potencia en la línea $i-j$, desde la línea $p-q$ donde se encuentra instalado el transformador defasador. El control local es un caso particular del control remoto cuando $i=p$ y $j=q$.

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados del impacto del transformador defasador sobre el flujo de potencia activa en la línea 2-3 para una tolerancia de 1 MW. Se observa que al cambiar positivamente el ángulo de defasamiento, el ángulo del nodo 3 se incrementa y el flujo de potencia aumenta, en tanto, que al cambiar negativamente disminuye el ángulo del nodo 3 y disminuye también el flujo de potencia transmitido. En ambos casos el ángulo del nodo 2 prácticamente se mantiene constante con relación a los cambios del nodo 3.

Tabla 4.3 Resultados del efecto del transformador defasador en la línea 2-3 sobre la potencia activa.

| ϕ (Grad) | δ_2 (Grad) | δ_3 (Grad) | P_{23} (MW) | Iter. |
|---------------|-------------------|-------------------|---------------|-------|
| 10 | -3.1103 | 1.6663 | 45.3629 | 3 |
| 8 | -3.1090 | 0.2540 | 40.2568 | 3 |
| 6 | -3.1084 | -1.1534 | 35.1640 | 3 |
| 4 | -3.1085 | -2.5589 | 30.0797 | 3 |
| 2 | -3.1094 | -3.9656 | 25.0000 | 3 |
| 0 | -3.1110 | -5.3764 | 19.9184 | 3 |
| -2 | -3.1133 | -6.7945 | 14.8324 | 3 |
| -4 | -3.1165 | -8.2230 | 9.7372 | 3 |
| -6 | -3.1203 | -9.6650 | 4.6287 | 3 |
| -8 | -3.1250 | -11.1241 | -0.4968 | 3 |
| -10 | -3.1305 | -12.6036 | -5.6428 | 3 |

En la Figura 4.13 se presenta en forma gráfica el comportamiento de la potencia activa, ante cambios del ángulo de defasamiento. Se observa un comportamiento lineal, el rango del flujo de potencia activa (50 MW) en este sistema de prueba 2 es menor que el obtenido en el sistema de prueba 1 para caso de un enlace de dos líneas de reactancias iguales (90 MW).

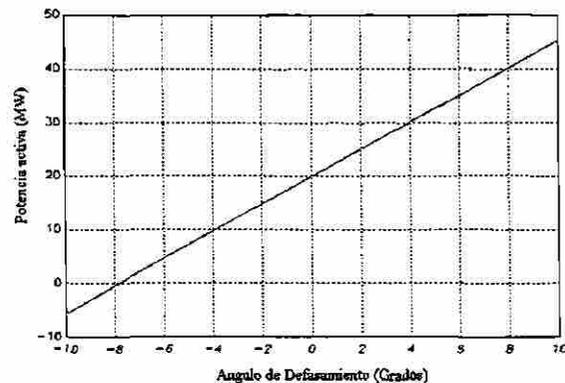


Fig. 4.13 Comportamiento de la potencia activa en la línea 2-3 debido al efecto del defasamiento.

Para analizar el control local y el control remoto de potencia activa, se presentan dos casos, aplicando un transformador defasador en la línea 2-3.

CASO 1.- Control Local.

CASO A.- Control del flujo de potencia activa por la línea 2-3 a 15 MW.

CASO B.- Control del flujo de potencia activa por la línea 2-3 a 30 MW.

CASO C.- Control del flujo de potencia activa por la línea 2-3 a 40 MW.

La Tabla 4.4 muestra los resultados para el CASO 1, indicando además número de iteraciones y ángulo de defasamiento necesario para controlar el flujo de potencia.

De los resultados de la Tabla 4.4 se observa que se logra controlar en forma efectiva el flujo de potencia en forma local en la línea 2-3. En las otras líneas ocurren cambios significativos en los flujos de potencia, por lo que es necesario conocer bien el sistema para lograr una adecuada redistribución y no causar problemas de sobrecargas en otros elementos de transmisión o aumentar las pérdidas.

Tabla 4.4 Resultados para control de potencia activa en forma local CASO 1.

| LÍNEAS | CASO BASE | CASO A | CASO B | CASO C |
|---------------|------------------|---------------|---------------|---------------|
| | P (MW) | P (MW) | P (MW) | P (MW) |
| 1-2 | 90 | 90.0000 | 90.0000 | 90.0000 |
| 2-3 | 20 | 15.3397 | 29.7214 | 39.4948 |
| 3-4 | -80 | -84.6603 | -70.2786 | -60.5052 |
| 2-6 | 70 | 74.6601 | 60.2786 | 50.5051 |
| 6-8 | -20 | -15.3398 | -29.7214 | -39.4948 |
| 4-7 | 100 | 95.3395 | 109.7214 | 119.4947 |
| 7-8 | 60 | 55.3396 | 69.7214 | 79.4947 |
| 5-4 | 180 | 180.0000 | 180.0000 | 180.0000 |
| 9-8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Iter. | 3 | 4 | 5 | 5 |
| ϕ (Grad) | 0 | -1.8981 | 3.8651 | 7.7116 |

CASO 2.- Control Remoto.

CASO A.- Control del flujo de potencia activa por la línea 3-4 a -50 MW.

CASO B.- Control del flujo de potencia activa por la línea 3-4 a -70 MW.

CASO C.- Control del flujo de potencia activa por la línea 3-4 a -90 MW.

La Tabla 4.5 muestra los resultados para el CASO 2, indicando además número de iteraciones y ángulo de defasamiento necesario para controlar el flujo de potencia.

El análisis de los resultados de la Tabla 4.5 muestra que es factible controlar en forma efectiva el flujo de potencia a los valores preestablecidos, se observa que los cambios en el ángulo de defasamiento son mayores con respecto al CASO 1. Para ambos casos se determinó un coeficiente de sensibilidad (S_{pq}) de 0.2957.

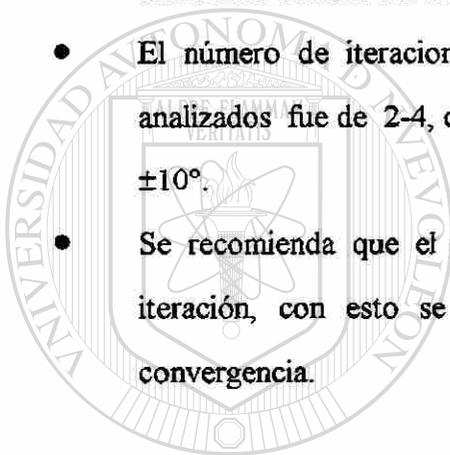
Tabla 4.5 Resultados para control de potencia activa en forma remota CASO 2.

| LINEAS | CASO BASE P (MW) | CASO A P (MW) | CASO B P (MW) | CASO C P (MW) |
|---------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1-2 | 90 | 90.0000 | 90.0000 | 90.0000 |
| 2-3 | 20 | 50.0119 | 30.1828 | 9.7367 |
| 3-4 | -80 | -49.9881 | -69.8172 | -90.2633 |
| 2-6 | 70 | 39.9881 | 59.7481 | 80.2642 |
| 6-8 | -20 | -50.0120 | -30.2418 | -9.7352 |
| 4-7 | 100 | 130.0119 | 110.1281 | 89.7352 |
| 7-8 | 60 | 90.0119 | 70.1975 | 49.7350 |
| 5-4 | 180 | 180.0000 | 180.0000 | 180.0000 |
| 9-8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Iter. | 3 | 5 | 3 | 4 |
| ϕ (Grad) | 0 | 11.82334 | 4.05337 | -3.88877 |

4.8 CONCLUSIONES.

- Un parámetro importante en el control del flujo de potencia activa en un elemento de transmisión es el ángulo de fase de los voltajes en los nodos extremos del elemento, el cual es posible modificar utilizando un transformador defasador.
- El modelo del transformador defasador genera una matriz de admitancias asimétrica que destruye la simetría de la matriz de admitancias del sistema de potencia.
- Para hacer eficiente la inclusión del transformador defasador en un estudio de flujos de potencia se debe mantener la simetría de la matriz de admitancias del sistema, modelando algunos efectos como inyecciones compensadoras.

- Mediante la aplicación de transformadores defasadores es posible controlar el flujo de potencia activa en forma local (en la misma línea) y en forma remota (en otra línea). Para esto, es necesario determinar un coeficiente de sensibilidad que relacione los cambios en los ángulos de fase nodales con la variación en el ángulo de defasamiento.
- De los resultados de simulaciones realizadas se concluye que la mejor opción para aplicar un transformador defasador en un sistema de potencia se logra cuando existen trayectorias alternas con flujos de potencia similares. En estas condiciones se obtiene el máximo cambio del flujo de potencia al variar el ángulo de defasamiento.
- El número de iteraciones para obtener convergencia en los sistemas de prueba analizados fue de 2-4, considerando una variación del ángulo de defasamiento de $\pm 10^\circ$.
- Se recomienda que el ajuste del defasamiento se realice a partir de la segunda iteración, con esto se logra disminuir el número de iteraciones para obtener convergencia.



UANL

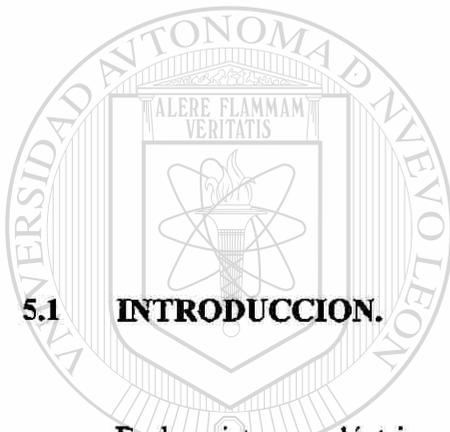
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Capítulo 5

MODELADO DE COMPENSACION SERIE CONTROLADA EN ESTUDIOS DE FLUJOS



5.1 INTRODUCCION.

En los sistemas eléctricos de potencia se presenta la necesidad de transferir en forma controlada grandes cantidades de energía a través de líneas de interconexión, las cuales producen problemas de caída de voltaje, problemas de estabilidad y problemas de efectos térmicos en conductores; mediante la aplicación de la Compensación Serie Controlada (CSC) en las líneas de transmisión, es posible superar parte de los problemas anteriores y sobre todo es posible controlar la potencia transmitida [34, 45].

La CSC forma parte de los sistemas de transmisión flexibles que utilizan la electrónica de potencia y los sistemas de control modernos, para obtener controles rápidos y flexibles según el comportamiento del sistema y la condición operativa [45].

En este capítulo se presentan los conceptos básicos de la compensación serie controlada y se describen los métodos utilizados para la modelación. La compensación serie consiste en cancelar parte de la reactancia inductiva de la línea por medio de capacitores serie controlados. Se detalla la forma de implementar los modelos de la CSC en un estudio de flujos de potencia. Compensar significa modificar sus características eléctricas a fin de incrementar su capacidad de transmisión de potencia.

5.2 ANALISIS DE LA TRANSMISION DE POTENCIA.

Una expresión simplificada para la transmisión de potencia activa entre dos puntos, está dada por (5.1) en la cual se puede analizar el impacto de cada una de las variables que intervienen [44].

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{x_{ij}} \text{sen } \delta_{ij} \quad (5.1)$$

- La diferencia de los ángulos de fase de los voltajes (δ_{ij}).
- La magnitud de voltaje en los extremos (V_i y V_j).
- La reactancia de la línea (x_{ij}).

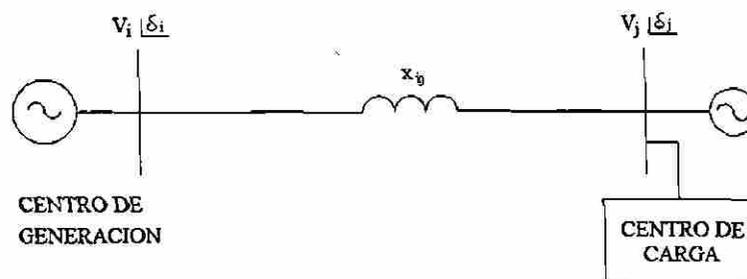


Fig. 5.1 Sistema eléctrico de potencia.

Si se compensa la línea de transmisión, de la Figura 5.2, la expresión para la potencia transmitida será:

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{x_{ij} - x_c} \text{sen } \delta_{ij} \quad (5.2)$$

donde: x_c Reactancia capacitiva del banco de capacitores serie.

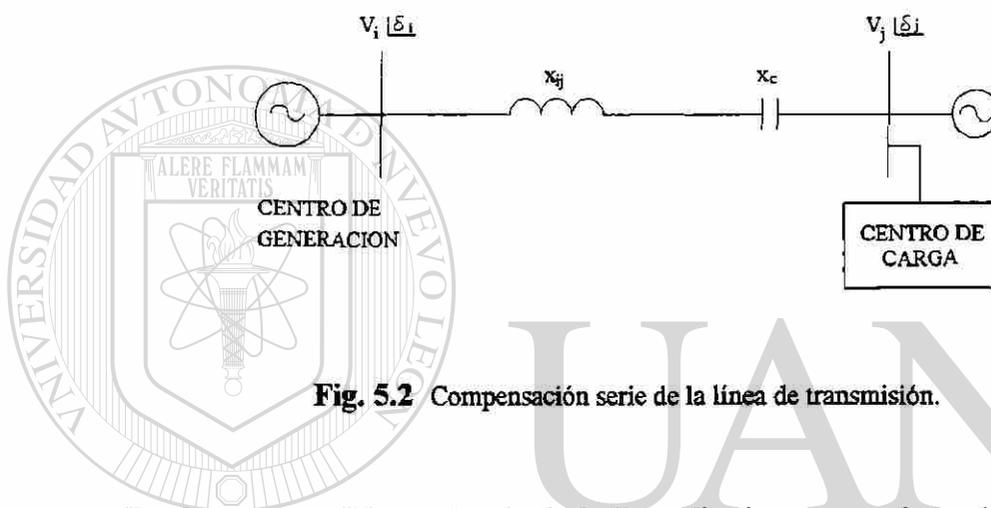


Fig. 5.2 Compensación serie de la línea de transmisión.

Se observa que si la reactancia de la línea disminuye por efecto de la compensación serie el flujo de potencia se incrementa. Se supone que los nodos extremos cuentan con fuentes de potencia reactiva para mantener las magnitudes de voltaje en su valor nominal. Lo importante es no reducir la transferencia de potencia debido a la degradación del perfil de voltaje [43, 44, 45].

5.3 COMPENSACION SERIE FIJA Y CONTROLADA.

Los sistemas de transmisión se diseñan tradicionalmente con compensación serie o en derivación, la cual puede ser fija o desconectable por medios mecánicos, para cancelar parte de la reactancia de la línea, minimizar la caída de voltaje, y controlar el flujo de potencia. La

Figura 5.3 muestra dos sistemas de potencia interconectados a través de dos líneas de transmisión en paralelo, la cual se utiliza para evaluar el impacto en la compensación serie en una de las líneas [45].

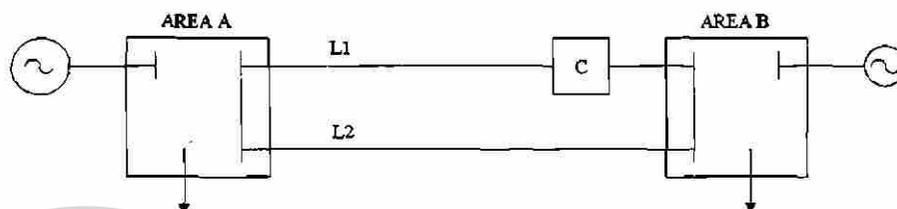


Fig. 5.3 Compensación en enlaces de transmisión.

Las trayectorias L1 y L2 tienen la misma reactancia, por lo tanto, transmiten el mismo flujo de potencia por estar eléctricamente en paralelo. Al insertar el banco de capacitores (C) del 50% en la línea L1, su reactancia se reduce al 50% del valor original alterando la distribución de flujos en las líneas, en esta situación L2 transmite un tercio del flujo total y L1 transmite dos tercios del valor total [45].

En general, el grado de compensación utilizado determinará el valor del flujo transmitido por la línea de interés, el cual puede crecer o decrecer. La compensación serie controlada en una línea de transmisión es una alternativa para incrementar la capacidad de transmisión en las instalaciones existentes. El grado o porcentaje de compensación de una línea de transmisión es un concepto muy empleado en los sistemas eléctricos de potencia, el cual se define como la relación entre la reactancia capacitiva serie y la reactancia inductiva serie de la línea de transmisión [35].

$$\% \text{ Compensación} = \frac{x_c}{x_L} * 100 \quad (5.3)$$

En teoría, se puede cancelar totalmente la reactancia inductiva de la línea, sin embargo, al reducirse a cero la reactancia total de la línea de transmisión, pequeños disturbios o fallas provocarían grandes flujos de corrientes en la red, además al quedar un circuito resonante a la frecuencia fundamental se presentarían voltajes y corrientes transitorias difíciles de controlar. Un alto grado de compensación también provoca problemas en los relevadores de protección durante fallas. Un límite práctico de compensación es del 80% y los valores comunes son del orden del 50% [35].

Existen algunos esquemas de compensación que tienen flexibilidad para la inserción de capacitores y/o reactores logrando con ello un aumento o disminución en la potencia transmitida, sin embargo, en la mayoría de los casos existen restricciones para realizar maniobras repetitivas rápidas, por problemas en el mantenimiento de interruptores, especialmente debido a que las interrupciones de corriente no son perfectas, es decir, que se generan transitorios en cada maniobra que pueden ocasionar algunos problemas de operación. En la Figura 5.4 se muestra un esquema de compensación serie fija en varios pasos [45].

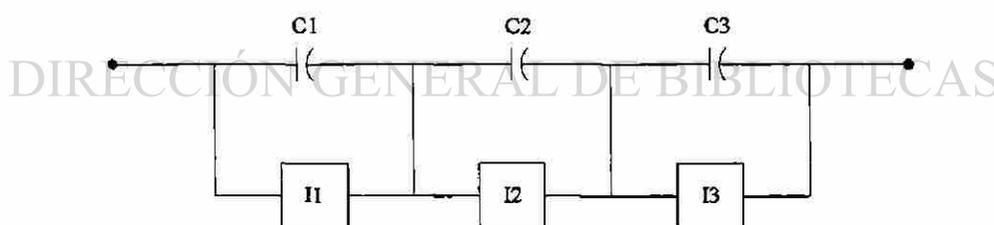


Fig. 5.4 Esquema de compensación serie.

En este esquema el control del flujo de potencia se lleva a cabo con la inserción de capacitores abriendo los interruptores (I1, I2, I3), lo que a su vez modifica las pérdidas de

transmisión en el sistema. El incremento en pérdidas activas justifica un análisis detallado para decidir si la compensación será fija o ajustable, dependiendo de la condición operativa.

La compensación serie controlada se refiere a tener un cierto grado de controlabilidad en la reactancia serie de la línea de transmisión; adicionalmente se debe tener rapidez para lograr el control. Con la combinación de la electrónica de potencia y los sistemas de control se ha logrado obtener esta flexibilidad [43]. La aplicación de tiristores de alta capacidad de corriente y nivel de voltaje ha sido muy importante para lograr mejorar la transmisión de potencia.

La conexión / desconexión de capacitores se realiza con gran rapidez ($1/2$ ciclo), sin esfuerzos o pérdida de vida en los componentes; generalmente, la conexión o desconexión de capacitores se realiza en forma discreta, y la conexión de reactores es controlada y continúa mediante el control del ángulo de disparo de tiristores [45]; como se muestra en la Figura 5.5.

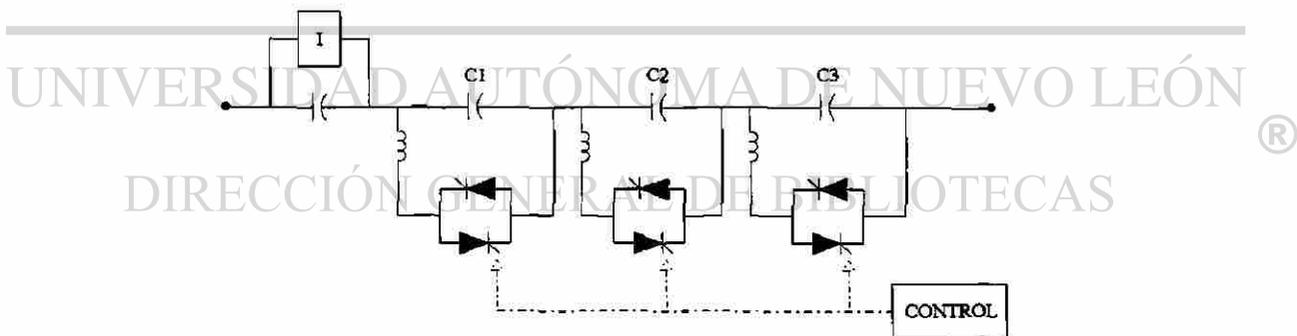


Fig. 5.5 Esquema de compensación serie controlada.

En este esquema de compensación la lógica de control toma la decisión de la conexión / desconexión de capacitores según las condiciones cambiantes del sistema de potencia de tal forma que se logre controlar el flujo de potencia en los valores preestablecidos. En la Figura

5.5 se presenta un esquema donde las secciones de compensación pueden ser conectadas o anuladas por tiristores. Se muestra un capacitor fijo que es conectado o desconectado a través de un interruptor.

Otro esquema de compensación serie capacitiva [45, 48] que se ha utilizado es el mostrado en la Figura 5.6, en el cual, parte de la compensación se conecta en paralelo con un reactor controlado por tiristores, con lo cual se logra el efecto de control continuo en la compensación serie, en este esquema se puede aumentar o disminuir la reactancia de la línea de transmisión y con ello el flujo de potencia.

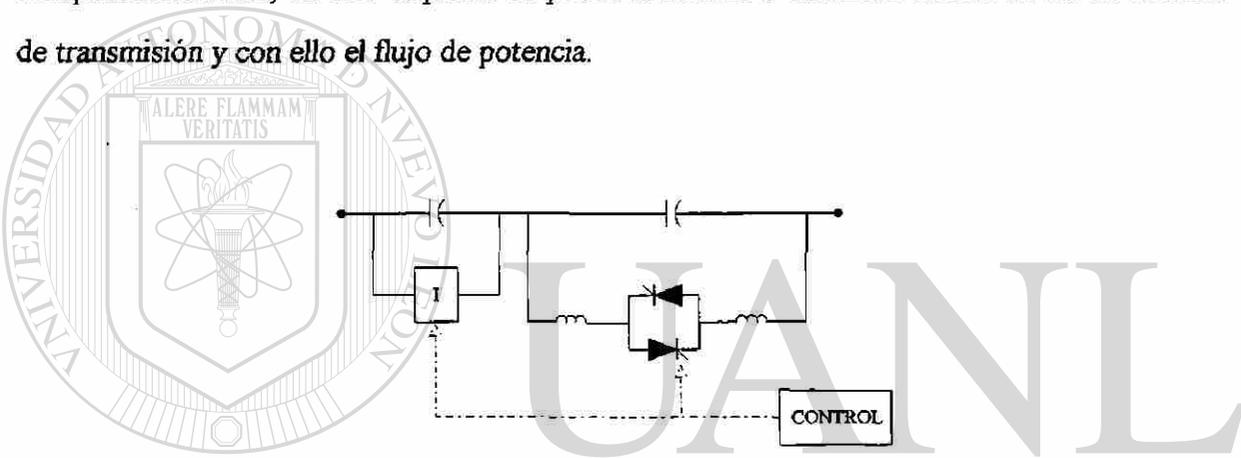


Fig. 5.6 Esquema alterno de compensación serie controlada.

5.4 METODOS DE COMPENSACION SERIE CONTROLADA EN ESTUDIOS DE FLUJOS.

La compensación serie controlada se puede ver, como un análisis de contingencias donde en lugar de adicionar o quitar elementos, éstos son modificados de acuerdo a los porcentajes deseados de compensación o cambios de reactancia; llegando incluso al caso extremo de compensar toda la línea de transmisión ($x_{ij} = x_c$) [34].

El análisis de la compensación serie controlada en estudios de flujos de potencia se puede realizar con dos procedimientos generales, los cuales parten de la ecuación matricial del análisis nodal (5.4).

$$\mathbf{Y V} = \mathbf{I} \quad (5.4)$$

donde: \mathbf{Y} Matriz nodal de admitancias.
 \mathbf{I} Vector de inyecciones nodales.
 \mathbf{V} Vector de voltajes nodales.

En un procedimiento se modifica directamente el valor del parámetro en la matriz de admitancias que representa la red eléctrica del sistema y se le conoce como método de modificación de datos. El otro realiza el análisis dejando constante la matriz de admitancias, que representa la red eléctrica del sistema, simulando el cambio en la reactancia serie de la línea a través de cambios en las inyecciones nodales de potencia, a este procedimiento se le conoce como método de Inyecciones nodales de potencia [34].

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

5.4.1 Método de Modificación de Datos.

Este método consiste en modificar la matriz de admitancias del sistema para cada cambio de la reactancia de la línea de transmisión por efecto de la compensación serie controlada. En este método no es necesario calcular inyecciones nodales de potencia para simular los cambios de topología, sin embargo, el proceso es más lento ya que se tiene que resolver el sistema de ecuaciones (5.4), invirtiendo aunque sea implícitamente la matriz de coeficientes que representa el sistema [34].

5.4.2 Método de Inyecciones nodales de potencia.

Este método consiste en simular los cambios en la reactancia de la línea compensada a través de inyecciones nodales de potencia en los nodos extremos, por lo que se debe determinar la inyección de potencia necesaria para que el flujo en la línea compensada sea el que se obtendría después de cambiar el valor de la reactancia de la línea. Además no es necesario modificar la matriz de admitancias del sistema, lo cual constituye una gran ventaja, desde el punto de vista computacional, para obtener la solución con rapidez.

El método de inyecciones nodales de potencia se puede aplicar en problemas no lineales utilizando algunas aproximaciones o transformando el problema a una secuencia de problemas lineales, para llegar a la solución en forma iterativa.

Suponiendo que la línea conectada entre los nodos i - j es la línea compensada, los cambios en la reactancia se simulan mediante una inyección de potencia en el nodo i denominada $P_{x_{ij}}$ y otra del mismo valor saliendo del nodo j , como se muestra en la Figura 5.7.

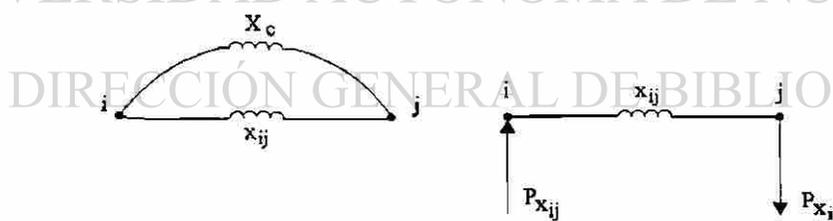


Fig. 5.7 Inyecciones nodales de potencia para simular los cambios de reactancia.

Para efectuar la simulación del cambio de reactancia de la línea i - j , se conecta una reactancia ficticia X_c en paralelo con la reactancia de la línea i - j , de tal forma que el paralelo

de las dos reactancias es el valor de reactancia total que simula el cambio en la reactancia inductiva de la línea, siendo necesario determinar el valor de X_c para efectuar el cambio.

De la Figura 5.7 se tiene:

$$\frac{X_c x_{ij}}{X_c + x_{ij}} = X_{tot} \quad (5.5)$$

despejando X_c resulta:

$$X_c = \frac{X_{tot} x_{ij}}{x_{ij} - X_{tot}} \quad (5.6)$$

Ahora la reactancia total de la línea después de aplicar un cambio de reactancia (Δx) se determina por (5.7).

$$X_{tot} = x_{ij} - \Delta x \quad (5.7)$$

Sustituyendo (5.7) en (5.6), resulta la expresión para determinar la reactancia ficticia que es función de los cambios de reactancia.

$$X_c = \frac{x_{ij}(x_{ij} - \Delta x)}{\Delta x} \quad (5.8)$$

El cambio de reactancia (Δx) se va ajustando para simular el cambio en la reactancia de la línea y a su vez el cambio en la inyección nodal de potencia en los extremos de la línea compensada. El flujo de potencia que circula por la línea ficticia, (utilizando (5.8)), es el valor del cambio en la inyección nodal de potencia, dada por la expresión simplificada (5.9).

$$\Delta P_{x_{ij}} = \frac{\Delta x (\delta_i - \delta_j)}{x_{ij}(x_{ij} - \Delta x)} = -\Delta P_{x_{ij}} \quad (5.9)$$

Expresión que es incluida directamente en el vector de términos independientes del método de Newton-Raphson.

Para determinar el coeficiente de sensibilidad que relaciona los cambios en el ángulo de fase de los voltaje nodales con los cambios de reactancia, se parte del sistema de la Figura 5.8 [34, 35].

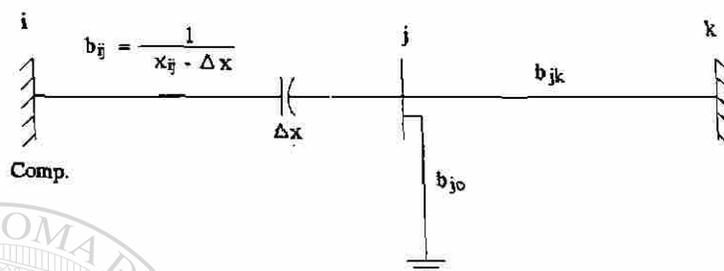


Fig. 5.8 Sistema básico para analizar el efecto del cambio de reactancia.

Suponiendo que sólo existen cambios en la reactancia de la línea compensada, el flujo neto de potencia por la línea i-j no debe cambiar $\Delta P_{ij} = 0$; por el hecho de que no se está haciendo ningún cambio en la matriz de admitancias del sistema, como se muestra en (5.10).

$$\Delta P_{ij} = \frac{\partial P_{ij}}{\partial (x_{ij} - \Delta x)} \Delta x + \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j = 0 \quad (5.10)$$

de donde se obtiene:

$$\frac{\Delta \delta_j}{\Delta x} = - \frac{\frac{\partial P_{ij}}{\partial (x_{ij} - \Delta x)}}{\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j}} = - \left(\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j} \right)^{-1} \left(\frac{\partial P_{ij}}{\partial (x_{ij} - \Delta x)} \right) = -S_{ij} \quad (5.11)$$

El cambio en el flujo de potencia por la línea compensada en forma simplificada es:

$$\Delta P_{ij} = \frac{(\Delta \delta_i - \Delta \delta_j)}{(x_{ij} - \Delta x)} \quad (5.12)$$

Utilizando la expresión simplificada del cambio de flujo de potencia (5.12) para determinar los términos de $\left(\frac{\partial P_j}{\partial \delta_j}\right)^{-1}$ y $\left(\frac{\partial P_j}{\partial (x_{ij} - \Delta x)}\right)$. De esta forma se determina el valor del coeficiente de sensibilidad dado por (5.13), que es función del cambio de reactancia y de los cambios de los ángulos de fase.

$$S_{ij} = \frac{(\Delta \delta_i - \Delta \delta_j)}{(x_{ij} - \Delta x)} \quad (5.13)$$

De (5.12) se tiene $(\Delta \delta_i - \Delta \delta_j) = \Delta P_{ij} (x_{ij} - \Delta x)$, y como los cambios en el ángulo del nodo i son cero debido a que es un nodo de voltaje controlado (nodo compensador), Figura 5.8, sustituyendo en (5.11) se obtiene la expresión que relaciona los cambios en el flujo de potencia para un cambio de reactancia o en forma inversa, el cambio en el ángulo para obtener un nivel de flujo de potencia, esto es:

$$\frac{\Delta P_{ij} (x_{ij} - \Delta x)}{\Delta x} = S_{ij} \quad (5.14)$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Finalmente, el objetivo es obtener los cambios en la reactancia de la línea compensada para controlar el flujo de potencia activa a un valor preestablecido, mediante (5.15).

$$\Delta x = \frac{\Delta P_{ij} (x_{ij} - \Delta x)}{S_{ij}} = \frac{(P_{ij}^{esp} - P_{ij}^{cal})(x_{ij} - \Delta x)}{S_{ij}} \quad (5.15)$$

Donde P_{ij}^{cal} está en función de los cambios de la reactancia de la línea compensada; de tal forma que se puede obtener el flujo de potencia activa que circula por la línea i - j mediante (5.16); es una expresión simplificada para sistemas de potencia en alto voltaje.

$$p_{ij}^{cal} = \frac{|V_i||V_j|\text{sen}(\delta_i - \delta_j)}{(x_{ij} - \Delta x)} \quad (5.16)$$

Para controlar la potencia activa a un valor, el coeficiente de sensibilidad debe ser determinado en cada iteración, debido al comportamiento no lineal de la potencia activa ante los cambios de reactancia. El cambio en la reactancia se va actualizando en cada iteración de acuerdo con (5.17).

$$\Delta x^i = \Delta x^{i-1} + \Delta x \quad (5.17)$$

5.5 INCLUSION DEL METODO DE MODIFICACION DE DATOS EN ESTUDIOS DE FLUJOS DE POTENCIA.

La compensación serie utilizando el Método de Modificación de Datos (MMD) consiste en modificar directamente la matriz de admitancias del sistema para cada cambio de reactancia [34]. Con este método se pueden tener los siguiente modelados de compensación serie para controlar el flujo de potencia transmitido.

- a) Modelado de Compensación Serie Fija. Esta forma de implementar la compensación serie, consiste en cambiar directamente el valor de la reactancia de la línea en la matriz de admitancias del sistema en forma externa y se observa el flujo de potencia activa hasta obtener el deseado. Es un cambio discreto de reactancia.
- b) Modelado de Compensación Serie Controlada. En esta implementación la matriz de admitancias del sistema se modifica en cada iteración y se verifica el valor deseado del flujo de potencia activa transmitido, el cambio en la reactancia de la línea se logra dando incrementos en la reactancia de la línea los cuales pueden ser fijos o variables. La desventaja es una convergencia lenta.

- c) Otra forma de modelar la Compensación Serie Controlada en flujos de potencia utilizando el MMD es modificando la matriz de admitancias del sistema en cada iteración, pero ahora los cambios de reactancia se realizan en base al coeficiente de sensibilidad que relaciona los cambios de ángulos de fase con los cambios de reactancia de la línea compensada; esta forma es eficiente, debido a que realiza de 2-6 iteraciones dentro de la región factible de cambio de reactancia.

5.6 INCLUSION DEL METODO DE INYECCIONES NODALES DE POTENCIA EN ESTUDIOS DE FLUJOS DE POTENCIA.

La compensación serie controlada utilizando el Método de Inyecciones nodales de Potencia (MIP) consiste en que a través de cambios en las inyecciones nodales de potencia se simulan los cambios de reactancia de la línea compensada, sin modificar la matriz de admitancias del sistema; dichas inyecciones nodales simulan cargas en los nodos extremos para forzar el flujo de potencia. Con este método se pueden también tener los siguientes modelados de compensación serie para controlar el flujo de potencia transmitido.

- a) Modelado de Compensación Serie Fija. Esta forma de implementar la compensación serie en estudios de flujos de potencia es en forma discreta, consiste en determinar el valor de la inyección nodal de potencia la cual es función de los cambios de reactancia, por lo que compensa en forma discreta un cierto cambio de reactancia. Utilizando esta implementación se determina en forma general el comportamiento de la potencia activa en la línea de interés; llegando a definir el rango factible del cambio de reactancia en el cual es posible controlar el flujo de potencia, según las condiciones de generación, demanda y topología existente en ese momento para no tener problemas de convergencia.

- b) **Modelado de Compensación Serie Controlada.** La inclusión de la compensación serie controlada utilizando el método de inyecciones nodales de potencia en estudios de flujos de potencia, consiste en determinar el valor de las inyecciones nodales de potencia que son función de los cambios de reactancia, las cuales se inyectan en los extremos de la línea compensada, el cambio de reactancia se actualiza aplicando un coeficiente de sensibilidad que relaciona los cambios de ángulos de fase con cambios de reactancia, como se describió en la sección 5.4.2, esta implementación es efectiva para controlar el flujo de potencia a un valor especificado dentro del rango factible de cambio de reactancia, sin cambiar la matriz de admitancias del sistema.

En la Figura 5.9 se presenta un diagrama de flujo del método de Newton-Raphson modificado con la inclusión del modelo de la Compensación Serie Controlada, utilizando el Método de Inyecciones nodales de potencia, por ser efectivo para controlar la potencia activa.

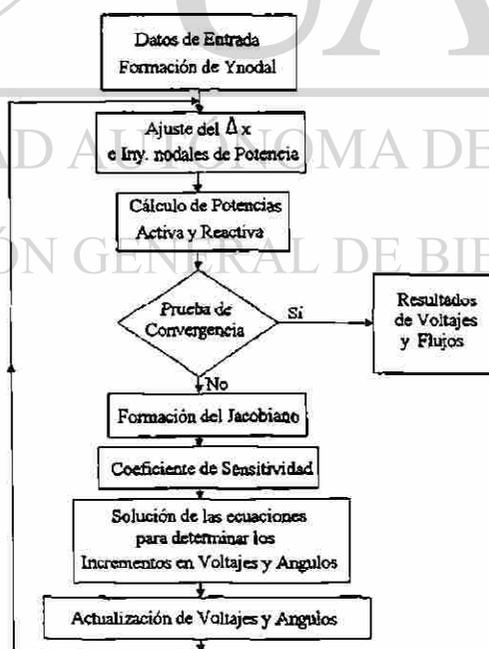


Fig. 5.9 Diagrama de flujo de N-R modificado con la inclusión del modelo de la Compensación Serie Controlada.

5.7 SISTEMA DE PRUEBA 1.

En la Figura 5.10 se muestra el sistema de prueba 1, son dos áreas interconectadas a través de dos líneas de transmisión. Se consideran magnitudes de voltaje nominales en cada área, con esto se trata de evitar reducir la transmisión de potencia por caída de voltaje. La compensación serie es aplicada en la línea 1-2 (A). Se consideran únicamente valores de reactancia en los elementos de transmisión por ser un sistema de transmisión en alta tensión.

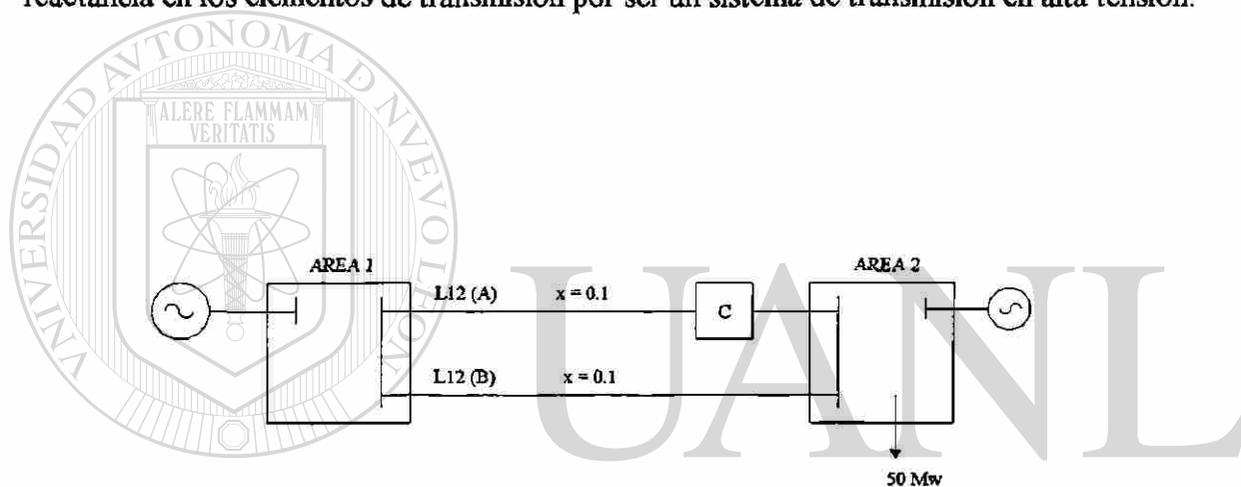


Fig. 5.10 Sistema de prueba 1.

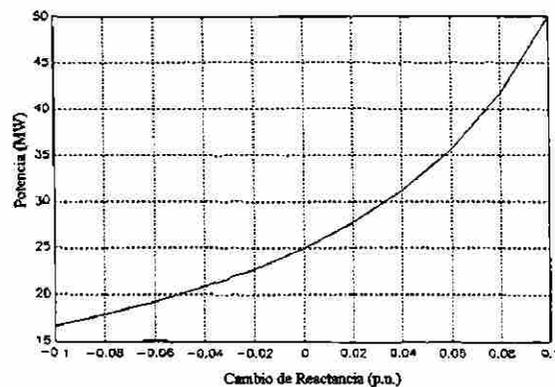
Se analiza la compensación serie con los dos métodos implementados; Método de Modificación de Datos y el Método de Inyecciones nodales de potencia. En la Tabla 5.1 se presentan los resultados obtenidos en el sistema de prueba. Se analiza el comportamiento de la potencia activa de la línea en la cual se aplica la compensación serie en forma general.

Tabla 5.1 Resultados del efecto de la compensación serie sobre la potencia activa.

| $\Delta x(\text{pu})$ | $X_{12}(\text{pu})$ | $P_{12A}(\text{MW})$ | $P_{12B}(\text{MW})$ | $\delta_2(\text{Grad})$ | Iter.(MMD) |
|-----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|------------|
| -0.1 | 0.2 | 16.6663 | 33.2272 | -1.9099 | 2 |
| -0.08 | 0.18 | 17.8566 | 32.1374 | -1.8416 | 2 |
| -0.06 | 0.16 | 19.2311 | 30.7644 | -1.7629 | 2 |
| -0.04 | 0.14 | 20.8332 | 29.1626 | -1.6711 | 2 |
| -0.02 | 0.12 | 22.7272 | 27.2695 | -1.5626 | 2 |
| 0 | 0.10 | 25 | 25 | -1.4324 | 2 |
| 0.02 | 0.08 | 27.7753 | 22.2205 | -1.2732 | 2 |
| 0.04 | 0.06 | 31.2502 | 18.7491 | -1.0743 | 2 |
| 0.05 | 0.05 | 33.3333 | 16.6667 | -0.9549 | 2 |
| 0.06 | 0.04 | 35.7128 | 14.2855 | -0.8185 | 2 |
| 0.08 | 0.02 | 41.6665 | 8.3336 | -0.4775 | 2 |
| 0.1 | 0 | 50 | 0 | 0 | 2 |

Se observa que si el cambio de reactancia se incrementa, el flujo de potencia activa en la línea 1-2 (A) aumenta y el ángulo de fase del nodo 2 decrece, en tanto, que la línea 1-2 (B) transmitirá el resto de potencia para satisfacer la demanda. Se utiliza el MMD para determinar el comportamiento de la potencia activa ante los cambios de reactancia en forma general.

En la Figura 5.11 se presenta en forma gráfica el comportamiento no lineal de la potencia activa con respecto al cambio de reactancia.

**Fig. 5.11** Efecto en la potencia activa del cambio de reactancia.

El número de iteraciones con el método de modificación de datos es el mismo para cualquier cambio de reactancia, mientras que con el método de inyecciones nodales de potencia al crecer el cambio de reactancia aumenta el número de iteraciones, esto se debe a que cuando la reactancia total de la línea disminuye, el flujo de potencia tiende a crecer según (5.2) lo cual puede causar problemas de convergencia.

En el caso de dos líneas en paralelo, si la compensación serie cancela toda la reactancia de la línea 1-2(A), significa que la línea compensada transmitirá toda la potencia demandada y la otra no transmitirá.

En la Tabla 5.2 se presentan varios resultados del control de la potencia activa a valores previamente establecidos, aquí lo que se evalúa es el cambio de reactancia necesario para controlar la potencia y el número de iteraciones para obtener la solución.

Tabla 5.2 Resultados del control de potencia activa a valores preestablecidos.

| $P_{12(A)}^{esp}$ (MW) | Δx (p.u.) | $P_{12(A)}$ (MW) | Iter. (MIP) |
|------------------------|-------------------|------------------|-------------|
| 20 | -0.04572 | 20.8296 | 5 |
| 22 | -0.02315 | 22.8763 | 4 |
| 24 | -0.0040 | 24.9995 | 2 |
| 26 | 0.00589 | 25.5226 | 3 |
| 28 | 0.01935 | 27.3998 | 4 |
| 30 | 0.03069 | 29.2064 | 4 |
| 32 | 0.04147 | 31.2713 | 4 |
| 34 | 0.05238 | 33.8099 | 4 |
| 36 | 0.06374 | 36.9451 | 5 |
| 37 | 0.06643 | 37.5796 | 8 |

En todos los casos presentados en la Tabla 5.2 se llegó a los valores de potencia activa preestablecidos. Utilizando el método de Inyecciones nodales de potencia se obtienen resultados aceptables con compensación del 70%; siendo este el rango factible ($0 < \Delta x < 70\%$) donde se puede obtener solución, cambios de reactancia arriba de este valor presentan problemas de convergencia, como se refleja en el incremento de las iteraciones al controlar a un nivel de potencia alto (37 MW), en el sentido opuesto, controlar a un nivel de potencia bajo (20 MW) también se observa un incremento de iteraciones.

La Figura 5.12 muestra la convergencia del algoritmo para el control de potencia activa a un valor preestablecido, en este caso, a 28 MW en la línea 1-2 (A) del sistema de prueba. Se observa una convergencia rápida. En dos iteraciones se llega a la solución sin control, en la tercera iteración se realiza el control de potencia activa y finalmente en la cuarta iteración, ya que la potencia deseada está dentro de la tolerancia, converge a la solución.

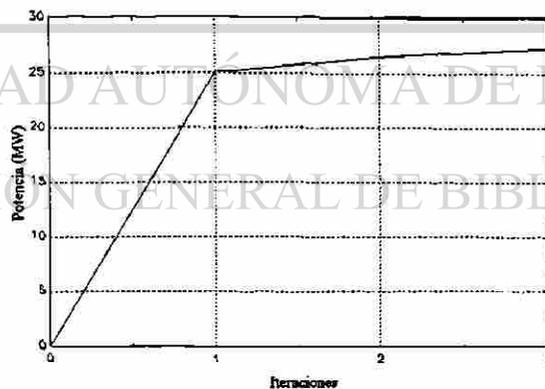


Fig. 5.12 Convergencia del algoritmo para controlar la potencia a un valor específico.

5.8 SISTEMA DE PRUEBA 2.

El sistema de prueba 2 es una variante del sistema de prueba 1, con líneas de diferentes longitudes, Figura 5.13. En el caso base sin incluir compensación la potencia transmitida por las líneas 1-2 (A) y 1-2 (B) es 1/3 y 2/3 de la potencia demandada. En la Tabla 5.3 se presentan resultados del efecto de la compensación serie controlada.

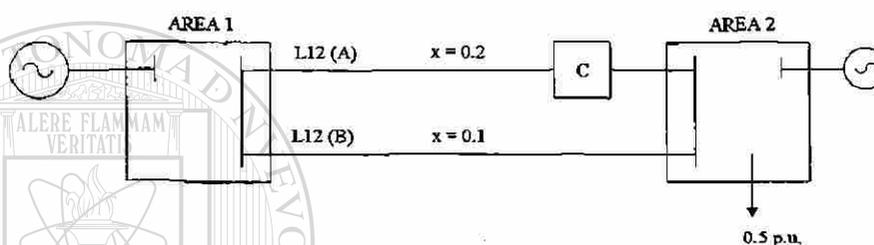


Fig. 5.13 Sistema de prueba 2.

Tabla 5.3 Resultados del efecto de la CSC sobre la potencia activa para el sistema de prueba 2.

| Δx (p.u.) | X_{12} (p.u.) | $P_{12(A)}$ (MW) | $P_{12(B)}$ (MW) | δ_2 (Grad) | Iter. (MMD) |
|-------------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|-------------|
| -0.1 | 0.30 | 12.5001 | 37.4912 | -2.1486 | 2 |
| -0.08 | 0.28 | 13.1578 | 36.8338 | -2.1109 | 2 |
| -0.06 | 0.26 | 13.8858 | 36.1033 | -2.0690 | 2 |
| -0.04 | 0.24 | 14.7028 | 35.2868 | -2.0222 | 2 |
| -0.02 | 0.22 | 15.6251 | 34.3683 | -1.9695 | 2 |
| 0 | 0.20 | 16.6667 | 33.3333 | -1.9099 | 2 |
| 0.02 | 0.18 | 17.8566 | 32.1374 | -1.8416 | 2 |
| 0.04 | 0.16 | 19.2311 | 30.7644 | -1.7629 | 2 |
| 0.06 | 0.14 | 20.8332 | 29.1626 | -1.6711 | 2 |
| 0.08 | 0.12 | 22.7272 | 27.2695 | -1.5626 | 2 |
| 0.1 | 0.10 | 25.0000 | 25.0000 | -1.4324 | 2 |
| 0.12 | 0.08 | 27.7774 | 22.2205 | -1.2732 | 2 |
| 0.14 | 0.06 | 31.2502 | 18.7491 | -1.0743 | 2 |

De los resultados de la Tabla 5.3 se observa que al aumentar el cambio de reactancia positivamente se incrementa la potencia activa transmitida, el ángulo del nodo 2 decrece, y al aumentar negativamente la reactancia ocurre lo contrario. Los resultados fueron obtenidos con el método de modificación de datos cambiando directamente el valor de la reactancia de la línea en la matriz de admitancias.

En la Figura 5.14 se presenta el impacto del cambio de reactancia sobre el flujo de potencia activa transmitida.

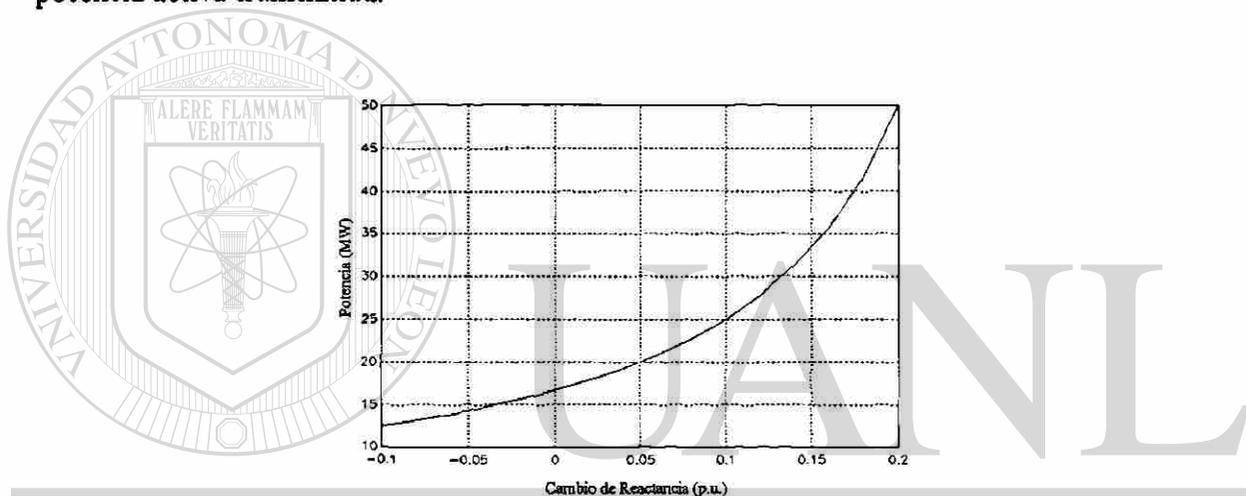


Fig. 5.14 Comportamiento de la potencia activa por efecto de compensación.

En la Tabla 5.4 se presentan los resultados para el caso de controlar el flujo de potencia activa a valores preestablecidos en la línea compensada. Se representa el número de iteraciones, y el cambio de reactancia requerido para controlar la potencia. Se observa que se logra controlar la potencia activa a los valores preestablecidos dentro del rango factible de control con una tolerancia de 1 MW. Usando el método de inyecciones nodales de potencia se obtiene solución en el rango (0 - 70%) de compensación, arriba del cual se presentaron problemas de convergencia.

Tabla 5.4 Resultados del control de potencia a valores preestablecidos.

| $P_{12(A)}^{esp}$ (MW) | Δx (p.u.) | $P_{12(A)}$ (MW) | Iter. (MIP) |
|------------------------|-------------------|------------------|-------------|
| 14 | -0.05397 | 14.4224 | 4 |
| 16 | -0.00796 | 16.6663 | 2 |
| 18 | 0.02029 | 17.6355 | 3 |
| 20 | 0.04758 | 19.4479 | 3 |
| 22 | 0.07228 | 21.8999 | 3 |
| 24 | 0.9436 | 24.6073 | 4 |
| 25 | 0.10216 | 25.5102 | 5 |
| 26 | 0.10962 | 26.4728 | 6 |
| 27 | 0.11726 | 27.6595 | 7 |

La diferencia importante entre el sistema de prueba 1 y el sistema de prueba 2 está en la efectividad del cambio de reactancia para controlar la potencia activa de la línea compensada. El flujo de potencia en la línea compensada, es:

$$P_{LC} = P_c \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{x_{LC}}{x_{L1}} \right)} \right)$$

donde: P_{LC} Potencia en la línea compensada.

x_{LC} Reactancia total de la línea compensada.

x_{L1} Reactancia de la línea en paralelo con la línea compensada.

P_c Potencia activa demandada.

Si x_{LC} es grande el flujo de potencia por la línea compensada tiende a cero.

Si x_{LC} es pequeña el flujo de potencia por la línea compensada es P_c .

Si $x_{L1} = x_{LC}$ el flujo por la línea compensada es la mitad del flujo demandado.

Por lo tanto, los resultados indican que el mayor cambio en el flujo de potencia se logra con el sistema de prueba 1 donde se tienen líneas con reactancias iguales.

En la Figura 5.15 se presentan casos extremos de aplicar la CSC en líneas con reactancias diferentes, las reactancias de las líneas son:

$$A.- x_{12(A)} = 0.1 \text{ y } x_{12(B)} = 0.1.$$

$$B.- x_{12(A)} = 0.1 \text{ y } x_{12(B)} = 0.4.$$

$$C.- x_{12(A)} = 0.4 \text{ y } x_{12(B)} = 0.1.$$

Las curvas de la Figura 5.15 fueron obtenidas utilizando el Método de Modificación de Datos y se observa que la característica A (reactancias en las líneas iguales) presenta una mayor variación de potencia activa ante un cambio de reactancia, aproximadamente un cambio de ± 10 MW en el rango (0 - 70%), en los casos B y C se reduce la efectividad a ± 6 MW aproximadamente. La mayor efectividad del cambio de reactancia se tiene cuando la pendiente de la curva es mayor y en el rango (0 - 70%) la pendiente de A es mayor que la de B o C.

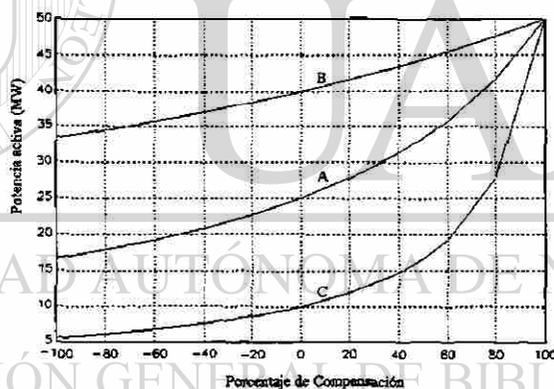


Fig. 5.15 Impacto del porcentaje de compensación sobre la potencia activa para diferentes longitudes de líneas.

5.9 SISTEMA DE PRUEBA 3.

La Figura 5.16 muestra un sistema de prueba de 9 nodos, donde la compensación serie controlada se aplica en la línea 2-3, para controlar el flujo de potencia por dicha línea y en otras.

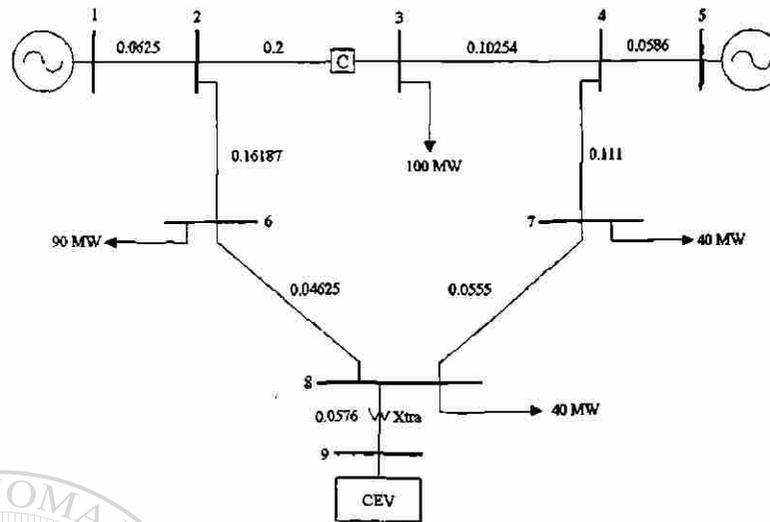


Fig. 5.16 Sistema de prueba 3.

En la Tabla 5.5 se presentan los resultados del comportamiento de la potencia activa ante los cambios de reactancia en la línea 2-3.

Tabla 5.5 Resultados de la potencia activa ante cambios de reactancia en la línea 2-3.

| Δx (p.u.) | X_{23} total (p.u.) | P_{23} (MW) | Iter.(MMD) |
|-------------------|-----------------------|---------------|------------|
| -0.1 | 0.30 | 17.3680 | 3 |
| -0.08 | 0.28 | 17.8231 | 3 |
| -0.06 | 0.26 | 18.3025 | 3 |
| -0.04 | 0.24 | 18.8083 | 3 |
| -0.02 | 0.22 | 19.3427 | 3 |
| 0 | 0.20 | 20.0000 | 3 |
| 0.02 | 0.18 | 20.5071 | 3 |
| 0.04 | 0.16 | 21.1431 | 3 |
| 0.06 | 0.14 | 21.8193 | 3 |
| 0.08 | 0.12 | 22.5397 | 3 |
| 0.1 | 0.10 | 23.3087 | 3 |

De los resultados de la Tabla 5.5 se observa un comportamiento poco sensible del flujo de potencia por esa línea ante los cambios de reactancia; por lo que es importante determinar la efectividad de aplicar la compensación serie controlada en cualquier línea del sistema. Los resultados muestran que sólo es posible variar ± 3 MW al variar prácticamente $\pm 50\%$ de reactancia de la línea.

En la figura 5.17 se presenta el comportamiento de la potencia activa en la línea 2-3 al cambio de reactancia.

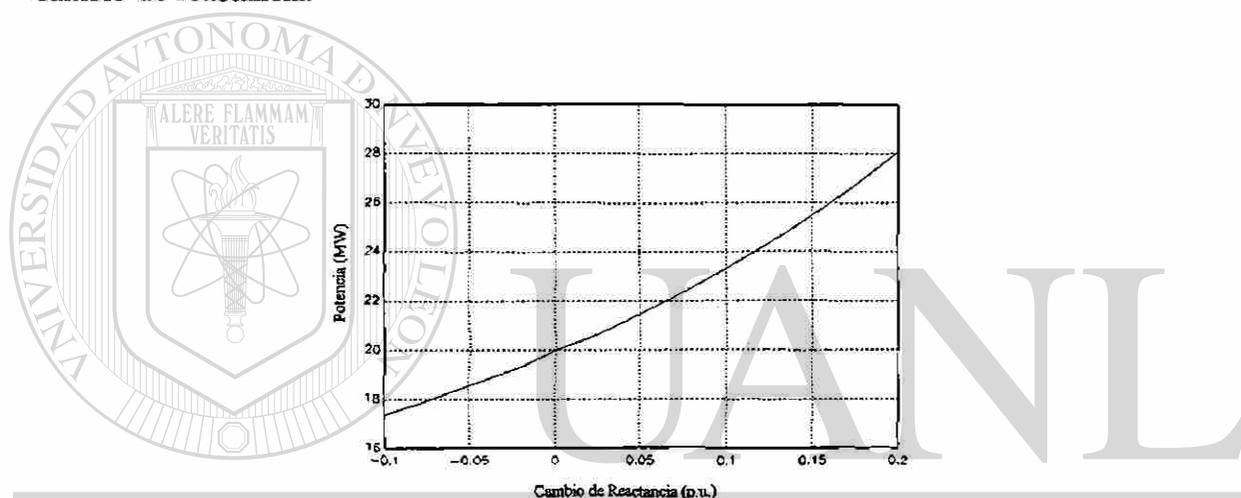


Fig. 5.17 Comportamiento de la potencia activa de la línea 2-3 ante cambios de reactancia.

En la Tabla 5.6 se muestran los resultados para controlar el flujo de potencia activa por la línea 2-3 a valores preestablecidos utilizando el método de inyecciones nodales de potencia.

Se puede observar que se llega a los valores preestablecidos dentro del rango factible y con la tolerancia especificada, se presentan cambios grandes de reactancia y poco cambio en el flujo de la línea, lo que indica que bajo estas condiciones de demanda y generación no es atractivo aplicar compensación serie controlada en esta línea.

Tabla 5.6 Resultados del control local de la potencia activa a valores preestablecidos en la línea 2-3.

| P_{23}^{esp} (MW) | Δx (p.u.) | P_{23} (MW) | Iter. (MIP) |
|---------------------|-------------------|---------------|-------------|
| 18 | -0.04829 | 18.8811 | 4 |
| 19 | -0.02097 | 19.4732 | 3 |
| 20 | -0.00370 | 19.7267 | 3 |
| 21 | 0.01994 | 20.2940 | 4 |
| 22 | 0.04823 | 21.1974 | 5 |
| 23 | 0.07723 | 22.2739 | 6 |
| 24 | 0.10105 | 23.1956 | 6 |
| 25 | 0.12676 | 24.3116 | 6 |

En la Tabla 5.7 se presentan diferentes situaciones de control de potencia activa, tanto en la línea compensada (Control local) como en otras líneas (Control remoto).

Tabla 5.7 Resultados del control remoto de la potencia activa a valores preestablecidos para el sistema de prueba 3.

| LINEAS | Caso Base | $P_{23}=18$ MW | $P_{23}=22$ MW | $P_{23}=25$ MW | $P_{26}=72$ MW | $P_{34}=-78$ MW |
|-------------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 1 - 2 | 90 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 |
| 2 - 3 | 20 | 18.8811 | 21.1974 | 24.3116 | 18.5993 | 21.4265 |
| 3 - 4 | -80 | -81.1189 | -78.8026 | -75.6884 | -81.4007 | -78.5735 |
| 2 - 6 | 70 | 71.1190 | 68.8026 | 65.6884 | 71.4007 | 68.5735 |
| 6 - 8 | -20 | -18.8810 | -21.1974 | -24.3115 | -18.5993 | -21.4265 |
| 4 - 7 | 100 | 98.8810 | 101.1974 | 104.3115 | 98.5992 | 101.4263 |
| 7 - 8 | 60 | 58.8810 | 61.1974 | 64.3115 | 58.5993 | 61.4264 |
| 4 - 5 | -180 | -180.00 | -180.00 | -180.00 | -180.00 | -180.00 |
| 9 - 8 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Iter.(MIP) | 3 | 4 | 5 | 6 | 6 | 4 |
| Δx (p.u.) | 0 | -0.04829 | 0.04823 | 0.12676 | -0.05845 | 0.05004 |

De los resultados de la Tabla 5.7 se observa que se llega a los valores predefinidos de potencia activa, los cuales están muy cerca del caso sin compensación debido a la poca efectividad del cambio en el flujo al cambiar la reactancia. También se observa que en los

casos de control remoto se presenta un cambio más grande de reactancia para controlar el flujo y un incremento en el número de iteraciones. Se puede observar la redistribución del flujo de potencia en las otras líneas al controlar el flujo por la línea de interés.

5.10 SISTEMA DE PRUEBA 4.

En el sistema de prueba 4 se presenta una variante del sistema de prueba 3, Figura 5.18, con cambios de topología y demanda de tal forma que se tenga un flujo de potencia igual en las líneas en paralelo 2-3; de esta forma se tendrá una mayor sensibilidad del flujo de potencia ante los cambios de reactancia que el sistema de prueba 3.

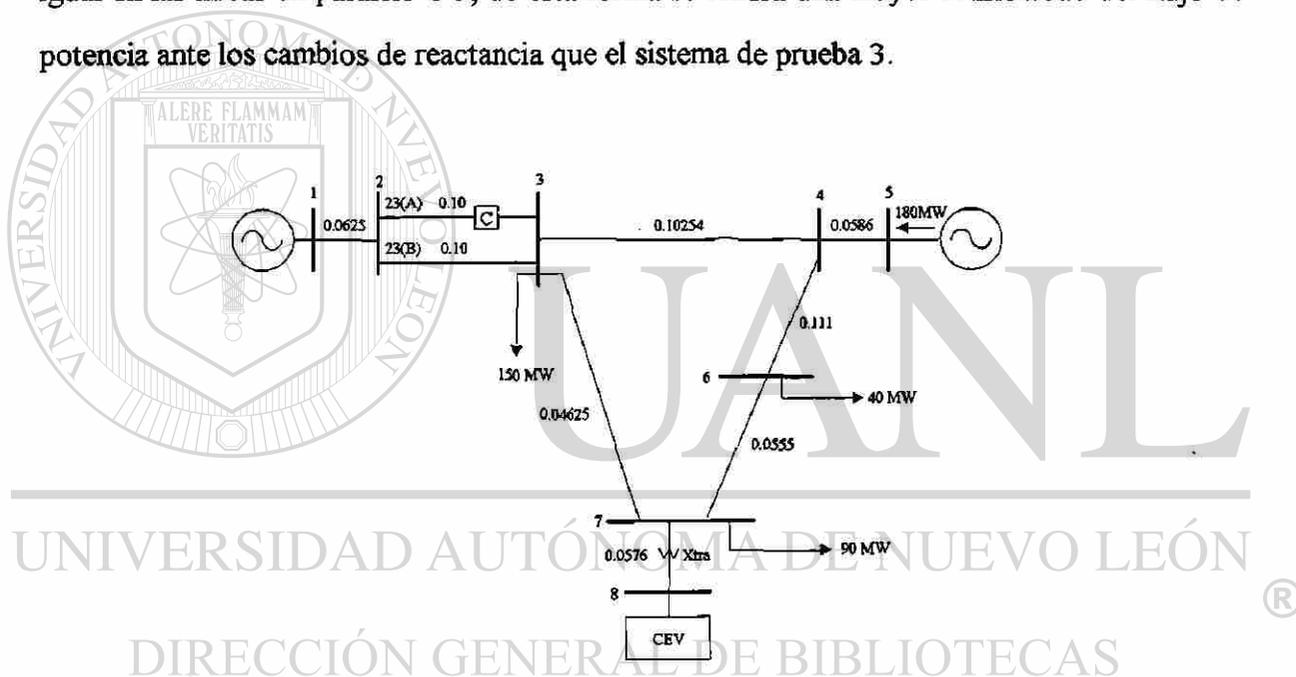


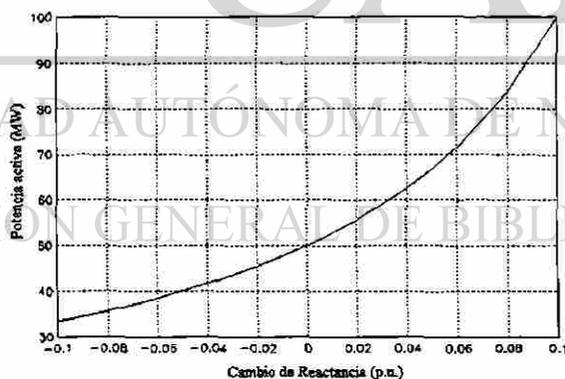
Fig. 5.18 Sistema de prueba 4.

En la Tabla 5.8 se presentan en forma general los resultados del impacto de la compensación serie controlada en el flujo de potencia activa en la línea 2-3(A). Se observa una redistribución de flujos de potencia únicamente en las líneas en paralelo 2-3, el resto del sistema no tiene cambios.

Tabla 5.8 Resultados del efecto de la Compensación Serie sobre la potencia activa en el sistema de prueba 4.

| Δx (p.u.) | $X_{23(A)}$ (p.u.) | $P_{23(A)}$ (MW) | $P_{23(B)}$ (MW) | Iter.(MMD) |
|-------------------|--------------------|------------------|------------------|------------|
| -0.1 | 0.2 | 33.3333 | 66.6667 | 3 |
| -0.08 | 0.18 | 35.7164 | 64.2986 | 3 |
| -0.06 | 0.16 | 38.4640 | 61.5503 | 3 |
| -0.04 | 0.14 | 41.6693 | 58.3451 | 3 |
| -0.02 | 0.12 | 45.4576 | 54.5566 | 3 |
| 0 | 0.10 | 50 | 50 | 3 |
| 0.02 | 0.08 | 55.5662 | 44.4535 | 3 |
| 0.04 | 0.06 | 62.5120 | 37.5078 | 3 |
| 0.05 | 0.05 | 66.6667 | 33.3333 | 3 |
| 0.06 | 0.04 | 71.4375 | 28.5776 | 3 |
| 0.08 | 0.02 | 83.3467 | 16.6707 | 3 |
| 0.1 | 0 | 100 | 0 | 3 |

En la Figura 5.19 se presenta el comportamiento de la potencia activa en la línea 2-3 (A) ante cambios de reactancia.

**Fig. 5.19** Comportamiento de la potencia activa ante cambios de reactancia para el sistema de prueba 4.

En la Tabla 5.9 se presentan varios casos de controlar el flujo a valores preestablecidos. Se observa que se llega al valor deseado con la tolerancia especificada, se aprecia también mayor sensibilidad del flujo de potencia activa ante los cambios de reactancia

producidos por la CSC en la línea (± 15 MW aproximadamente). En el rango factible de cambio de reactancia normalmente se realizan de 2-6 iteraciones.

Tabla 5.9 Resultados del control de potencia activa a valores preestablecidos.

| $P_{23(A)}^{esp}$ (MW) | Δx (p.u.) | $P_{23(A)}$ (MW) | Iter. (MIP) |
|------------------------|-------------------|------------------|-------------|
| 30 | -0.13059 | 30.8213 | 8 |
| 35 | -0.08311 | 35.9083 | 6 |
| 40 | -0.04766 | 40.9302 | 6 |
| 45 | -0.02064 | 45.7120 | 5 |
| 50 | 0 | 49.4028 | 3 |
| 55 | 0.01707 | 54.3733 | 5 |
| 60 | 0.03179 | 59.0750 | 5 |
| 65 | 0.04488 | 64.1718 | 5 |
| 70 | 0.05758 | 70.3068 | 5 |
| 75 | 0.06683 | 75.1184 | 9 |

5.11 CONCLUSIONES.

- Uno de los parámetros importantes en la determinación del flujo de potencia activa en una línea de transmisión es su reactancia, la cual es posible controlar con la aplicación de esquemas de compensación serie controlada.
- Se presentaron dos alternativas para modelar la compensación serie controlada en estudios de flujos de potencia; el método de modificación de datos y el método de inyecciones nodales de potencia.
- Con el método de inyecciones nodales los efectos del cambio de reactancia se modelan a través de inyecciones de potencia en los nodos extremos de la línea compensada, sin modificar la matriz de admitancias del sistema.

- La modelación de la compensación serie controlada es eficiente y confiable dentro de un rango de variación de reactancia, normalmente $0 < \Delta x < 70\%$, para valores superiores al 70% se encontraron problemas de convergencia.
- Para ajustar el cambio de reactancia es necesario utilizar un coeficiente de sensibilidad que relacione los cambios en los ángulos de fase nodales con los cambios de reactancia.
- Se recomienda que el ajuste del cambio de reactancia mediante inyecciones nodales se realice a partir de la segunda iteración, tratando de estar más cerca de la solución, con lo cual también se mejora el proceso de convergencia.
- La efectividad de la compensación serie controlada en el control de potencia activa depende en forma importante de la reactancia de las líneas involucradas. A medida que las reactancias de las trayectorias alternas son más diferentes la efectividad disminuye.
- La mejor aplicación de la compensación serie controlada se logra en líneas que tengan valores similares de reactancia y transmitan el mismo flujo de potencia, obteniendo en este caso la máxima sensibilidad en el flujo de potencia activa al cambiar la reactancia.
- En los sistemas de prueba utilizados el número de iteraciones para controlar el flujo de potencia activa en valores preestablecidos fue de 2-6, para los casos donde se opera dentro del rango de compensación (0-70%).
- El control remoto de potencia activa requiere un mayor cambio de reactancia para controlar el flujo de potencia en un valor específico.
- La convergencia del proceso de solución es más lenta en casos con control remoto en algunas situaciones se presentan problemas de convergencia porque el rango de variación de flujo es muy reducido.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 INTRODUCCION.

En este capítulo se presentan las conclusiones más importantes de este trabajo, las aportaciones del mismo y se hacen algunas recomendaciones para investigaciones futuras relacionadas con el tema.

6.2 CONCLUSIONES.

6.2.1 Conclusiones Generales.

- Cada uno de los modelos analizados en esta investigación se implementaron en el algoritmo de flujos de potencia basado en el método de Newton-Raphson, todos los modelos fueron incluidos en forma externa, modificando el vector de inyecciones de potencia, sin alterar el algoritmo básico.
- La modelación de los dispositivos presentados también es posible aplicarlos en el método desacoplado rápido, ajustandose fácilmente a la formulación básica del algoritmo, sin reestructurar la técnica de solución.
- Los dispositivos modelados en esta investigación son una alternativa técnica y económicamente competitiva para incrementar la capacidad de los sistemas de transmisión.

6.2.2 Conclusiones para Modelado de Cargas.

- Al modelar las cargas eléctricas en función del voltaje se obtiene una respuesta más real del comportamiento de los flujos de potencia en un sistema.
 - Se presentaron dos alternativas factibles para la modelación de cargas eléctricas en función del voltaje; una utiliza inyecciones de potencia, la otra emplea equivalentes Norton.
 - Las dos alternativas de modelación permiten representar diversos modelos de carga particulares (potencia constante, corriente constante e impedancia constante) o combinaciones de ellos.
 - Al utilizar equivalentes Norton en la modelación de carga, la matriz de admitancias del sistema se hace más dominante, con lo cual se obtiene un sistema de ecuaciones más estable y una mejor convergencia en el proceso de solución.
 - Una desventaja menor de la representación de cargas con equivalentes Norton es el incremento en requerimientos computacionales para incluir el equivalente activo y pasivo de la carga.
-
- Con las dos alternativas de implementación probadas se obtienen aproximadamente los mismos resultados, magnitudes de voltaje y flujos de potencias, excepto cuando las variaciones de demanda son grandes, en este caso, el modelo basado en inyecciones nodales de potencia puede presentar problemas de convergencia.
 - Las mejores características de convergencia se presentan para la modelación con equivalentes Norton cuando la carga se representa como impedancia constante.
 - En las pruebas realizadas se observó que las cargas que demandan potencia constante tienen mayores problemas de convergencia, tanto usando inyecciones nodales de potencia como empleando equivalentes Norton.

6.2.3 Conclusiones para Modelado de Compensadores Estáticos de Var's.

- El control de voltaje en un sistema eléctrico de potencia depende de la utilización coordinada de las fuentes de potencia reactiva disponibles, como son; generadores, condensadores síncronos, compensadores estáticos de var's y elementos reactivos en derivación.
 - En un estudio de flujos de potencia convencional se utilizan nodos de voltaje controlado, donde de alguna forma se varía la potencia reactiva de la fuente para mantener el voltaje en un valor especificado, se considera que la magnitud del voltaje se mantiene constante independientemente de la generación de potencia reactiva.
 - Mediante la utilización de Compensadores Estáticos de Var's es posible controlar el voltaje en el punto donde se inyecta la potencia reactiva (control local) o en un punto remoto del sistema de potencia.
 - El control de voltaje mediante CEV's se puede realizar con una característica de operación plana o polarizada, en este último caso el voltaje a controlar variará dependiendo de la inyección reactiva.
-
- Al utilizar un control de voltaje con característica plana hay mayores requerimientos de potencia reactiva que con una característica polarizada, con lo cual se disminuye la reserva de potencia reactiva.
 - En el control remoto de voltaje es necesario modificar el voltaje de referencia, utilizando un coeficiente de sensibilidad que relacione los cambios de voltaje en el nodo a controlar con los cambios del voltaje de referencia.
 - En las pruebas realizadas con el control de voltaje remoto, se presenta una convergencia más lenta con característica polarizada que con característica plana.

- Cuando se presentan violaciones en los límites de reactivos de un compensador estático de potencia reactiva es recomendable representar el CEV como un elemento en derivación (capacitivo o inductivo).

6.2.4 Conclusiones para Modelado del Transformador Defasador.

- Un parámetro importante en el control del flujo de potencia activa en un elemento de transmisión es el ángulo de fase de los voltajes en los nodos extremos del elemento, el cual es posible modificar utilizando un transformador defasador.
- El modelo del transformador defasador genera una matriz de admitancias asimétrica que destruye la simetría de la matriz de admitancias del sistema de potencia.
- Para hacer eficiente la inclusión del transformador defasador en un estudio de flujos de potencia se debe mantener la simetría de la matriz de admitancias del sistema, modelando algunos efectos como inyecciones compensadoras.
- Mediante la aplicación de transformadores defasadores es posible controlar el flujo de potencia activa en forma local (en la misma línea) y en forma remota (en otra línea). Para esto, es necesario determinar un coeficiente de sensibilidad que relacione los cambios en los ángulos de fase nodales con la variación en el ángulo de defasamiento.
- El número de iteraciones para obtener convergencia en los sistemas de prueba analizados fue de 2-4, considerando una variación del ángulo de defasamiento de $\pm 10^\circ$.
- De los resultados de simulaciones realizadas se concluye que la mejor opción para aplicar un transformador defasador en un sistema de potencia se logra cuando existen trayectorias alternas con flujos de potencia similares. En estas condiciones se obtiene el máximo cambio del flujo de potencia al variar el ángulo de defasamiento.

6.1.4 Conclusiones para Modelado de la Compensación Serie Controlada.

- Uno de los parámetros importantes en la determinación del flujo de potencia activa en una línea de transmisión es su reactancia, la cual es posible controlar con la aplicación de esquemas de compensación serie controlada.
- Se presentaron dos alternativas para modelar la compensación serie controlada en estudios de flujos de potencia; el método de modificación de datos y el método de inyecciones nodales de potencia.
- Con el método de inyecciones nodales los efectos del cambio de reactancia se modelan a través de inyecciones de potencia en los nodos extremos de la línea compensada, sin modificar la matriz de admitancias del sistema.
- La modelación de la compensación serie controlada es eficiente y confiable dentro de un rango de variación de reactancia, normalmente $0 < \Delta x < 70\%$, para valores superiores al 70% se encontraron problemas de convergencia.
- Para ajustar el cambio de reactancia es necesario utilizar un coeficiente de sensibilidad que relacione los cambios en los ángulos de fase nodales con los cambios de reactancia.
- Se recomienda que el ajuste del cambio de reactancia mediante inyecciones nodales se realice a partir de la segunda iteración, tratando de estar más cerca de la solución, con lo cual también se mejora el proceso de convergencia.
- La efectividad de la compensación serie controlada en el control de potencia activa depende en forma importante de la reactancia de las líneas involucradas. A medida que las reactancias de las trayectorias alternas son más diferentes la efectividad disminuye.

- La mejor aplicación de la compensación serie controlada se logra en líneas que tengan valores similares de reactancia y transmitan el mismo flujo de potencia, obteniendo en este caso la máxima sensibilidad en el flujo de potencia activa al cambiar la reactancia.
- En los sistemas de prueba utilizados el número de iteraciones para controlar el flujo de potencia activa en valores preestablecidos fue de 2-6, para lo casos donde se opera dentro del rango de compensación (0-70%).
- El control remoto de potencia activa requiere de mayores cambios de reactancia para controlar el flujo de potencia en un valor específico.
- La convergencia del proceso de solución es más lenta en casos con control remoto en algunas situaciones se presentan problemas de convergencia porque el rango de variación de flujo es muy reducido.

6.3 APORTACIONES.

- Se presentaron algoritmos sencillos y eficientes para modelar en un estudio de flujos de potencia diversos dispositivos que permiten controlar el flujo de energía en un sistema de transmisión.
- Se implementaron y probaron todos los modelos presentados en la tesis, utilizando un programa de flujos de potencia basado en el método de Newton-Raphson versión polar.
- Se analizó la efectividad y las limitaciones de los dispositivos y controles a través de múltiples simulaciones en diversos sistemas de prueba con parámetros típicos.

6.4 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.

- Complementar este trabajo incluyendo la modelación de líneas de corriente directa en un estudio de flujos de potencia, analizando especialmente el control de la transmisión de potencia.
- Investigar el impacto de los controles presentados en esta tesis en el comportamiento dinámico de los sistemas de potencia.
- Evaluar la implementación de los dispositivos de control presentados en sistemas de potencia reales.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



REFERENCIAS.

- [1] W.W. Price, K.A. Wirgau, A. Mordoch, J.V. Mitsche, E. Vaahedi, M.A. El Kady, "Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies", *IEEE Trans. PWRS-3*, Págs. 180-187, 1988.
- [2] IEEE Task Force, "Load Representation for Dinamic Performance Analysis", *IEEE Pub. 92 WM126-3 PWRS*, 1993.
- [3] C. Concordia, "Representation of Loads", *IEEE Winter Meeting*, 1975.
- [4] C. Concordia and Ihara, "Load Representation in Power System Stability Studies", *IEEE Trans. PAS*, Vol 101, Págs. 969-977, 1982.
- [5] F. Aboytes, M. Flores, "Análisis de Convergencia en Estudios Dinámicos en Sistemas de Potencia", *IEEE novena reunión de Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica*, 1987.
- [6] L.D. Aréchiga, J.M. Cañedo, "Influencia e Implementación del Modelo de la Carga en Estudios de Sistemas de Potencia en Estado Estable", *IEEE México, RVP-94, Acapulco, Gro.*, 1994.
-
- [7] P. Moreno, H. Sarmiento, J. Naude, "Estudio de los Límites de Operación de Líneas de Transmisión con Compensación reactiva", *IEEE RVP'93-SIS-09*, RVP'1993.
- [8] G. Arroyo, F. Aboytes, "Estabilidad Transitoria en Sistemas Eléctricos de Potencia", *CFE*, 1991.
- [9] F. Aboytes, "Estabilidad Dinámica en Sistemas Eléctricos de Potencia", *CFE-CENACE*, 1991.
- [10] I.A.Hiskens, C.B. Mclean, "SVC Behaviour Voltage Collapse Conditions", *IEEE Trans. PWRS*, Págs. 1078-1087, 1992.
- [11] F. Aboytes G., "Operación y Control de Redes Eléctricas", *IEEE México, RVP-90-SIS-12, Acapulco, Gro.*, 1990.

- [12] F. Aboytes, G. Arroyo, "Análisis de Redes en la Operación de Sistemas Eléctricos Longitudinales", Parte I. Aspectos Conceptuales, *IEEE, MEXICON-83*, Cuernavaca, Mor., 1983.
- [13] G. Arroyo, F. Aboytes, "Análisis de Redes en la Operación de Sistemas Eléctricos Longitudinales", Parte II. Aplicaciones, *IEEE, MEXICON-83*, Cuernavaca, Mor., 1983.
- [14] Biyung Ha Lee, Kwang Y. Lee, "Dynamic and Static Voltage Stability Enhancement of Power Systems", *IEEE Trans. POWER*, Págs. 231-238, 1993.
- [15] E. Dorantes G., J.M. Reyes S., "Análisis de Sensitividad en la Operación y Desarrollo de Sistemas Eléctricos de Potencia", *IEEE RVP-90-SIS-09*, 1990.
- [16] T.J.E. Miller, "Reactive Power Control in Electrical Power Systems", *John Wiley & Sons*, New York, 1982.
- [17] CIGRE 38-01, Task Force No. 2 on SVC, I.A. Erinmez. "Static Var Compensators", 1986.
- [18] F. Aboytes, G. Arroyo, "Security Assessment in the Operation of Longitudinal Power Systems", *IEEE Trans. PAS*, Vol. PWERS-1, No.2, Págs. 225-232, mayo de 1986.
- [19] B. M. Weedy, "Electrical Power System ", *John Wiley & Sons*, 1967.
- [20] Antonio Gómez, J.L. Martínez, Yolanda Cuéllar, " Sensitivity- Based Reactive Power Control for Voltage Profile Improvement ", *IEEE Transactions on Power System*, Vol 8, No. 3 August 1993.
- [21] F. Aboytes, "Análisis de Seguridad para el Control de Voltaje y Potencia Reactiva", *Symposium SIEEEM-87*, Monterrey, N.L. Septiembre de 1987.
- [22] B. Stott, O. Alsac, "Fast Decoupled Load Flow", *IEEE Transactions on PWS* Vol. PAS-93, May 1974.

- [23] O. Alsac, B. Stott, W.F. Tinney, "Sparsity Oriented Compensations Methods for Modified Network Solutions", *IEEE Trans. PAS 102*, May 1983.
- [24] R.Lara, "Análisis de Contingencias en Estado Estable en Sistemas de Potencia", *Tesis de Maestría DEPMI-UNAM*, 1982.
- [25] J.J. Grainger, W.D. Stevenson Jr., "Power System Analysis", *McGraw Hill*, 1994.
- [26] G. Stagg, A.H. El-Abiad, "Computer Methods in Power System Analysis", *McGraw Hill*, 1968.
- [27] A. Bergen, "Power System Analysis", *Prentice Hall*, 1986.
- [28] C. A. Gross, "Power System Analysis", *John Wiley*, 1979.
- [29] CIGRE 38-206, "Method of Analysis and Assessment on Power System Voltage Phenomena and Improvements Stability Margins", Japon, 1992.
- [30] F. Aboytes, G. Arroyo, G. Villa, "Application of Static Var Compensators in Longitudinal Power Systems", *IEEE Transactions PWS*, Vol. PAS-102, 1983.
- [31] Jean León Eternod, "Ajuste de la Banda de Operación, Comportamiento Dinámico y Efectos sobre el Sistema del Compensador Estático de Var's en Culiacan", *IEEE MEXICON-92*, Guadalajara, Jal. México, 1992.
- [32] W.F. Tinney, "Compensation Methods for Network Solutions by Optimally Ordered Triangular Factorization", *IEEE Transaction Power Apparatus and Systems*, PAS-91, Págs. 123-127, Jan/Feb, 1972.
- [33] D. Shirmohammad, H.W. Hong, A. Semlyen, G. X. Luo, "A Compensation- Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks", *IEEE-Power Systems*, Vol.3, No. 2, May 1988.
- [34] F.Aboytes, "Análisis de Sistemas de Potencia", *F.I.M.E.* Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, N. L. México, 1990.
- [35] F. Aboytes, "Control de Voltaje en Sistemas Eléctricos de Potencia", *F.I.M.E.* Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, N. L. México, 1991.

- [36] P. Kundur, "Power System Stability and Control", *McGraw Hill*, 1993.
- [37] S. Chang, V. Brandwajn, "Adjusted Solutions in Fast Decoupled Load Flow", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3 No. 2, Mayo 1988.
- [38] F. Aboytes, "Análisis de Transformadores Defasadores en Estudios de Flujos", *Reporte interno CFE-CENACE-DID-04-88*, Julio 1988.
- [39] Z.X. Han, "Phase Shifter and Power Flow Control", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol PAS-101 No. 10, October 1982.
- [40] R. N. Allan, C. Arruda, "LTC Transformers and MVAR Violations in the Fast Decoupled Load Flow", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101 No.9, September 1982.
- [41] N.M. Peterson, W.S. Meyer, "Automatic Adjustment of Transformer and Phase-Shifter Taps in the Newton Power Flow", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS-90 No. 1, Jan/Feb. 1971.
- [42] L.D. Aréchiga, F. Aboytes, "Modelado de Transformadores en Sistemas de Potencia", *Proyecto de Investigación DIE-87-06, UANL*, Monterrey, N.L. México, Agosto 1987.
- [43] Narain G. Hingorani, "Flexible AC Transmission", *IEEE System / Power Spectrum*, April 1993.
- [44] Héctor G. Sarmiento, Raul Velázquez, "Sistemas Flexibles: ¿El futuro de la transmisión a Corriente Alterna?", *IEEE México, RVP-93-SIS-13*, Acapulco, Gro., RVP'1993.
- [45] F. Aboytes, "Sistemas de Transmisión Flexibles en la Operación de Sistemas de Potencia", *Simposium SIEEEM-93*, Monterrey, N.L., Octubre 1993.
- [46] Carlos Pérez Rojas, "Turbo Pascal en flujos de potencia usando el método de Newton Raphson", *IEEE México, RVP-92*, Acapulco, Gro., 1992.

- [47] L. Angquist, B. Lundin, J. Samuelsson, "Power Oscillation Damping using controlled Reactive Power Compensation A comparison between serie and shunt Approaches", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8 No. 2, May 1993.
- [48] G.D. Galanos, C.I. Hatziaioniu, X.J. Cheng, D. Maratukulam, "Advanced Static Compensator for Flexible AC Transmission", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 1, Febrero 1993.
- [49] Dragoslav Rajicic, Anjan Bose, "A Modification to the Fast Decoupled Power Flow for Networks with High R/X Ratios", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, No. 2, Mayo 1988.
- [50] A. Roman Messina, "Control de Voltaje y Potencia Reactiva mediante Compensadores Estáticos de Var's en Sistemas Eléctricos de Potencia", *Tesis de Maestría*, ESIME-IPN, 1987.
- [51] J. Alberto Avalos, Salvador Acha D., "Características de Convergencia de Algoritmos para el Estudio de Flujos de Carga", *IEEE México, RVP-95*, Acapulco, Gro., 1995.



APENDICE A

**DATOS TÍPICOS PARA LINEAS DE TRANSMISION Y TRANSFORMADORES
UTILIZADOS EN LOS SISTEMAS DE PRUEBA.**

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



APENDICE A

DATOS TÍPICOS PARA LINEAS DE TRANSMISION Y TRANSFORMADORES UTILIZADOS EN LOS SISTEMAS DE PRUEBA.

Tabla A1 Algunos datos típicos para líneas de transmisión.

| VOLTAJE (KV) | PARAMETROS | | | Zc (Ohms) | Pot. Natural SIL (MW) |
|-----------------|------------|---------|---------|--------------|--------------------------|
| | R | X | Y/2 | | |
| 34.5 | 4.67000 | 4.60000 | 0.00200 | 395 | 3 |
| 69.0 | 0.65480 | 1.11900 | 0.00800 | 390 | 12 |
| 115.0 | 0.10020 | 0.36507 | 0.02227 | 381 | 35 |
| 138.0 | 0.06340 | 0.25750 | 0.03166 | 384 | 50 |
| 161.0 | 0.05304 | 0.20410 | 0.04188 | 413 | 63 |
| 230.0 | 0.01373 | 0.09250 | 0.08807 | 386 | 137 |
| 400.0 | 0.00187 | 0.02387 | 0.33730 | 303 | 528 |
| 500.0 | 0.00116 | 0.01335 | 0.62218 | 259 | 965 |

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

- NOTAS:**
- 1.- Los parámetros R, X y Y/2 están en % por Km, en base a 100 MVA y voltaje nominal.
 - 2.- Los datos para 400 KV corresponden a una línea con dos conductores por fase y para 500 KV a una con cuatro.

Tabla A2 Datos de los transformadores utilizados en los sistemas de prueba.

| Para Sistema de Prueba 2, Figura 2.11 | |
|--|-------------------|
| Transformador | Reactancia |
| 1 - 2 | 0.0625 |
| 4 - 5 | 0.0586 |
| Para Sistema de Prueba 1, Figura 3.17 | |
| Transformador | Reactancia |
| 1 - 2 | 0.04 |
| 3 - 4 | 0.04 |
| Para Sistema de Prueba 2, Figura 3.19 | |
| Transformador | Reactancia |
| 1 - 2 | 0.0625 |
| 3 - 4 | 0.0586 |
| Para Sistema de Prueba 2, Figura 3.20 | |
| Transformador | Reactancia |
| 8 - 9 | 0.0576 |

