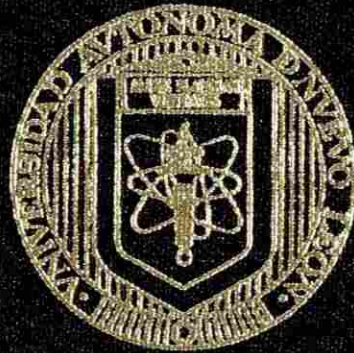


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



“COMPORTAMIENTO EN SISTEMAS DE POTENCIA
ANTE COLAPSO DE VOLTAJE”

POR

ING. PAVEL VALERO ESPARZA

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LA INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD
EN POTENCIA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. JUNIO DE 2001



1020145449



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



**“COMPORTAMIENTO EN SISTEMAS DE POTENCIA
ANTE COLAPSO DE VOLTAJE”**

POR

ING. PAVEL VALERO ESPARZA

TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LA INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD
EN POTENCIA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. JUNIO DE 2001

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**“COMPORTAMIENTO EN SISTEMAS DE POTENCIA
ANTE COLAPSO DE VOLTAJE”**

POR

ING. PAVEL VALERO-ESPARZA

TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



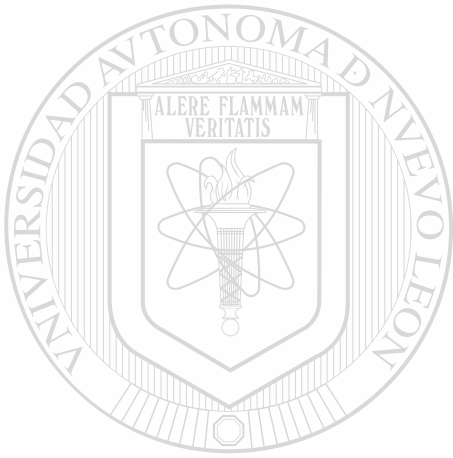
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LA INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD
EN POTENCIA**

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. JUNIO DE 2001

0150-03760 .

TH
Z5853
•M2
FINE
2001
V3



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

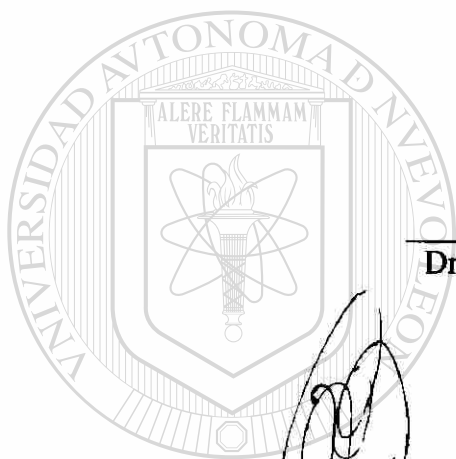


**FONDO
TESIS**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "COMPORTAMIENTO EN SISTEMAS DE POTENCIA ANTE COLAPSO DE VOLTAJE", realizada por el alumno Ing. Pavel Valero Esparza, matrícula 527784 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Potencia.

El Comité de Tesis





Dr. Fernando Manuel Betancourt Ramírez
Asesor


M.C. Félix González Estrada
Coasesor


M.C. Evelio P. González Flores
Coasesor

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS


M.C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudios de Post-grado
Vo. Bo.

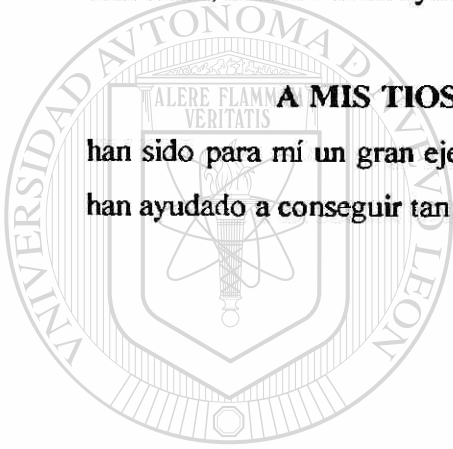
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Junio de 2001

DEDICATORIAS

A DIOS..... por darme la vida, a mis padres y la salud..... gracias te doy por la realización de este trabajo.

A MIS PADRES el Sr. José Ignacio Valero Durán y Sra. Francisca Esparza Arias, ¡GRACIAS! Por darme la vida, por enseñarme todo lo que he aprendido, gracias a Ustedes me encuentro hoy donde estoy, les agradezco todo el apoyo que me brindaron, el cual me ha ayudado a trazar un camino de “corazón”.

A MIS TIOS..... Vicente Esparza Arias y Victoriano Esparza Arias, que han sido para mí un gran ejemplo a seguir y con su cariño, paciencia y comprensión me han ayudado a conseguir tan anhelada meta.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



AGRADECIMIENTOS

A mis hermanos **José Iván Valero Esparza** y **Carlo Valero Esparza**, les agradezco sencillamente por ser mis hermanos ¡GRACIAS! Porque siempre me han apoyado para que yo siga adelante.

Agradezco en forma muy especial a mi asesor **Dr. Fernando Manuel Betancourt Ramírez**, por su magnífica dirección en el desarrollo de esta tesis.

Al **M.C. Hugo Guerrero García**. Por su amistad sincera y por sus valiosos comentarios que me sirvieron para llevar a cabo mi trabajo de tesis.

Al **M.C. Víctor García Sosa**. Por sus importantes comentarios y sugerencias.

A todos mis **compañeros de Trabajo**, en atención por su apoyo incondicional y valiosos comentarios que me ayudaron en el desarrollo de esta tesis.

A la **Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**, le doy gracias por la oportunidad que me ofreció al concederme un lugar en esta institución, facilitándome la realización de mis estudios.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

PRÓLOGO

Con el crecimiento natural de los Sistemas Eléctricos de Potencia debido a los requerimientos de energía eléctrica para llevar a cabo el desarrollo industrial de las sociedades modernas en las que la demanda se incrementa año con año, ha dado como resultado que la operación y el control sea cada vez mas compleja esto ha llevado a la aparición de nuevas estructuras y políticas energéticas tales como la apertura de inversión privada en la generación, transmisión y distribución y mercado de energía. En el caso de nuestro país la falta de inversión en el sector Eléctrico estan originando una serie de problemas en la operación y control de los mismos.

Ello nos obliga a explotar al máximo nuestro Sistema Eléctrico obligándonos a realizar un mayor esfuerzo encaminado hacia el desarrollo de nuevas metodologías y crear nuevas estrategias de operación que nos permitan adquirir a los operadores una mayor capacidad de análisis y un mayor conocimiento del comportamiento del Sistema Eléctrico.

Con el incremento de la demanda año con año los operadores se ven obligados a trabajar en límites operativos peligrosos, por esta razón es importante la elaboración de estrategias operativas actualizadas.

Una de las herramientas que se utiliza actualmente es el Simulador Interactivo de Sistemas de Potencia (SISP). El cual ha brindado un apoyo sólido en el estudio de Sistemas Eléctricos de Potencia en la creación y aplicación de estrategias operativas, a fin de lograr una explotación mas eficiente y segura del Sistema Eléctrico de Potencia.

Una de las funciones más importantes que se realizan en la operación de un Sistema Eléctrico de Potencia es el control de voltaje. Esta es una labor que requiere coordinación y bases conceptuales para lograr una aplicación eficiente. Por lo actual y la complejidad que presenta el problema de colapso de voltaje ha captado un creciente interés en las últimas dos décadas por parte de Investigadores e Ingenieros de la

Industria Eléctrica por todo el mundo, dando por resultado la publicación de reportes técnicos y artículos de investigación que analizan el problema desde diferentes puntos de vista.

En este trabajo de investigación se realiza un análisis teórico y conceptual lo más completo posible, y explotando al máximo el Simulador Interactivo de Sistemas de Potencia el cual nos ayuda a la construcción de las curvas P-V , Q-V. Lo cual nos dará un nuevo enfoque en cuanto a la condición de operación del Sistema Eléctrico de Potencia ayudándonos a crear estrategias operativas las cuales nos ayuden a evitar caer en un colapso de voltaje.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ÍNDICE

TEMA	Página
CAPITULO 1.- SÍNTESIS	1
CAPITULO 2.- INTRODUCCIÓN	3
2.1. Descripción del problema	3
2.2. Objetivo de la tesis	3
2.3. Hipótesis	3
2.4. Justificación del trabajo de la tesis	4
2.5. Límites del estudio	4
2.6. Metodología	4
2.7. Revisión Bibliográfica	5
CAPITULO 3.- ANTECEDENTES	7
3.1. Introducción	7
3.2. Antecedentes y motivación del problema	7
3.3. Problemática de planeación y problemática operativa	10
3.4. Resumen	12
CAPITULO 4.- CONCEPTOS GENERALES	13
4.1. Introducción	13
4.2. Estabilidad de voltaje	13
4.3. Inestabilidad de voltaje	14
4.4. Flujos de reactivos- control de voltaje	15
4.5. Control de voltaje local	20
4.6. Balance de potencia reactiva	22
4.6.1. Inyecciones de potencia reactiva	27
4.7. Coordinación de cambios	28
4.7.1. Flujos de potencia reactiva, pérdidas activas	29
4.7.2. Margen de potencia reactiva	32
4.8. Aspectos básicos para el análisis de la cargabilidad	33
4.8.1. Limitación térmica	34
4.8.2. Caída de voltaje	35
4.8.3. Margen de estabilidad de estado estable (ME)	36
4.8.4. Aspectos conceptuales	37
4.9. Curva de Clair	38

4.10. Cargabilidad de LT's en el SEN y su problemática de Operación	39
4.10.1. Comportamiento P-Q de las LT's	43
4.11. Resumen	46
CAPITULO 5.- COLAPSO DE VOLTAJE	47
5.1. Introducción	47
5.2. Mecanismos básicos de colapso de voltaje	48
5.3. Escenario típico de un colapso de voltaje	51
5.4. Características generales basadas en incidentes actuales	53
5.4.1. Clasificación de estabilidad de voltaje	54
5.5. Aspectos de Análisis de Estabilidad de Voltaje	55
5.5.1. Proximidad a la inestabilidad de voltaje	55
5.5.2. Mecanismos de inestabilidad de voltaje	57
5.6. Aplicación de CEV's para evitar colapsos de voltaje	58
5.7. Comportamiento de la carga	59
5.7.1. Tipos de carga	60
5.7.2. Características Q-V	62
5.8. Prevención de colapso de voltaje	64
5.8.1. Aplicación de dispositivos de compensación de potencia reactiva	64
5.8.2. Control de voltaje en la red y generador de potencia reactiva	65
5.8.3. Coordinación de control y protección	65
5.8.4. Control de transformadores con cambiador de Tap bajo carga ULTC	65
5.8.5. Margen de estabilidad	66
5.8.6. Reserva oscilante	66
5.8.7. Acciones de los operadores	67
5.9. Resumen	68
CAPITULO 6.- TÉCNICAS DE SOLUCIÓN	69
6.1. Introducción	69
6.2. Estructura del simulador	70
6.3. Descripción de funciones	71
6.3.1. Estudio de flujos de potencia	71
6.3.2. Estudio de fallas	72
6.3.3. Estudio de estabilidad en el dominio del tiempo	73
6.3.4. Estudio de estabilidad en el dominio de la frecuencia	75
6.3.5. Determinación de parámetros de líneas de transmisión	76
6.4. Manejo del modelo FLUJOS de Potencia.	77
6.4.1. Actividades	78

6.4.2. Archivos	78
6.4.3. Cambios	79
6.4.3.1 Cambios en generadores	80
6.4.3.2 Cambios en cargas	80
6.4.3.3 Cambios en la topología	81
6.4.3.4 Cambios en límites de líneas y nodos	82
6.4.3.5 Cambios en Tap's dinámicos	82
6.4.3.6 Cambios en nodos con control de voltaje mediante Tap's	83
6.4.3.7 Cambios en el control de voltaje de generadores	83
6.4.3.8 Cambios en líneas de interconexión	84
6.4.3.9 Cambios en intercambios	84
6.4.3.10 Cambios en nodos reguladores	84
6.4.3.11 Cambios en Transformadores Defasadores	85
6.4.4. Solución	85
6.4.5. Reportes	85
6.4.6. Entrada de información	86
6.4.7. Presentación de resultados	87
6.4.8. Secuencia de Ejecución	90
6.5. Ejemplos	92
6.5.1. Ejemplo de aplicación de Simulador Interactivo de Sistemas de Potencia	92
6.5.2. Análisis	96
6.5.3. Propuestas	96
6.5.4. Conclusiones	97
6.6. Resumen	99

CAPÍTULO 7.- ALTERNATIVAS Y PROPUESTAS 100

71. Introducción	100
7.2. Caso 1.	102
7.2.1. Antecedentes	102
7.2.2. Conclusiones	103
7.2.3. Análisis en estado estable	104
7.2.4. Conclusiones	107
7.2.5. Propuestas	108
7.3 Caso 2	110
7.3.1. Antecedentes	110
7.3.2. Condiciones del estudio	110
7.3.3. Análisis en estado estable	111
7.3.4. Conclusiones	112
7.4. Resumen	112

CAPÍTULO 8.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
8.1. Introducción	113
8.2. Conclusiones.	113
8.3. Recomendaciones para trabajos futuros	116
Bibliografía	118
Listado de Tablas	120
Listado de Figuras	121
Glosario	123
Resumen Autobiográfico	125



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



CAPÍTULO 1

SÍNTESIS

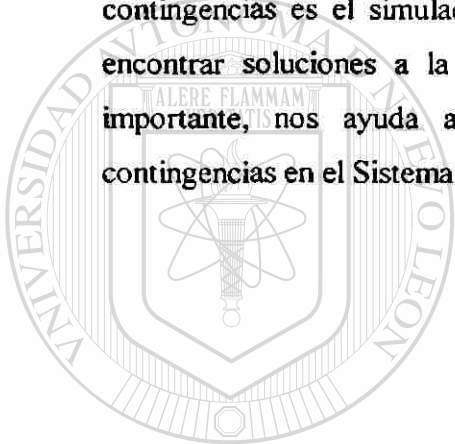
Con el crecimiento natural de los sistemas eléctricos de potencia, y la aplicación de nuevas políticas para el manejo y la administración de la industria eléctrica, como en el caso de nuestro país, se da origen a nuevos problemas en la operación y control de los mismos. Ello requiere un mayor esfuerzo encaminado hacia el diseño de nuevas metodologías que permitan una mejor capacidad de análisis y un mayor conocimiento del sistema eléctrico, a fin de lograr una explotación mas eficiente y segura.

La estabilidad de voltaje es un problema al que se ven expuestos los Sistemas Eléctricos de Potencia durante su operación cotidiana, y está fuertemente asociada con aspectos de estado estable, así como el comportamiento dinámico de los sistemas. El problema ha captado un creciente interés en las últimas dos décadas por parte de investigadores e ingenieros de la Industria Eléctrica alrededor del mundo, dando por resultado la publicación de reportes técnicos y artículos de investigación que analizan el problema desde diferentes puntos de vista.

Por lo actual y la complejidad que representa el problema de estabilidad de voltaje, en este trabajo de investigación se plantea abordar el análisis del mismo, estableciendo las bases teóricas y conceptuales referentes al tópico. Se revisa la formulación de metodologías usadas para el análisis del problema, las cuales han sido propuestas en la literatura técnica para la operación y el control de los Sistemas Eléctricos de Potencia.

En este trabajo de investigación se realiza un análisis teórico, lo más completo posible, sobre las características del Sistema Eléctrico de Potencia, se analizarán diferentes condiciones de operación y se simularán diferentes contingencias en el Sistema Eléctrico de Potencia realizados en simuladores de potencia con el fin de analizar las condiciones en que se encuentra el Sistema de Potencia, y encontrar soluciones operativas que nos ayuden a operar el Sistema de Potencia con mayor seguridad, y alejarnos de una condición de operación riesgosa.

Dentro de las herramientas que se utilizarán para realizar los análisis de las contingencias es el simulador interactivo de sistemas de potencia, que nos ayudará a encontrar soluciones a la problemática planteada en los casos analizados y lo más importante, nos ayuda a encontrar alternativas operativas de solución al tener contingencias en el Sistema Eléctrico de Potencia.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO 2

INTRODUCCIÓN

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El comportamiento de la estabilidad de voltaje ante cualquier perturbación, cuando el sistema de potencia se encuentra en condiciones críticas de operación. Ante demandas máximas ó pérdidas de generación ocasiona perturbaciones en el perfil de voltaje en el Sistema Eléctrico de Potencia, como consecuencia nos obliga a operar a un voltaje crítico y debemos tomar acciones para llevar el nivel de voltaje a condiciones normales de operación como medida correctiva, restringimos el suministro de energía a la industria y al sector residencial hasta que el sistema de potencia quede libre de cualquier perturbación y regrese a su nivel normal de voltaje de operación.

2.2 OBJETIVO DE LA TESIS

Identificación de alternativas operativas de solución ante colapso de voltaje, en sistemas de potencia.

2.3 HIPÓTESIS

Se parte de la existencia de diversas técnicas para solucionar el problema de colapso de voltaje por medio de soluciones digitales en la red de potencia.

Se tiene la hipótesis de que la implementación del control discreto suplementario como disparo automático de generación, disparo automático de carga, líneas de transmisión y compensador estático de var's ejercen efectos positivos en el perfil de voltaje de las barras. A través de diversos casos prácticos comprobar la efectividad de estos controles.

2.4 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TESIS

El problema de colapso de voltaje ha sido, seguirá siendo y será una problemática para todo sistema eléctrico de potencia, por lo cual se requiere una constante supervisión de los diversos factores que impactan en el comportamiento de este fenómeno eléctrico.

2.5 LÍMITES DEL ESTUDIO

El estudio se centra en un área de control de C.F.E. y en el análisis de diferentes casos reales en los cuales se tienen diferentes soluciones a los problemas presentados y simular problemáticas que puedan presentarse y obtener soluciones para estos posibles casos.

2.6 METODOLOGÍA

- * Recabar información que hasta este momento existe en casos tanto nacionales como internacionales .
- * Realizar simulaciones de casos con ayuda de simuladores digitales
- * Análisis de las simulaciones digitales
- * Obtención de conclusiones proporcionando alternativas de solución en los diferentes casos que se pueden presentar en condiciones de operación distinta

2.7. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

P. Kundor, "Power Systems Stability and Control". De este libro se tomaron conceptos básicos, relacionados con el tópico de voltaje, se tomó información relacionada con publicaciones anteriores para poder presentar una idea más clara y precisa del fenómeno de voltaje.

W.D. Stevenson, "Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia". En este libro, se tomaron conceptos para poder orientar este trabajo de investigación, se analizaron aspectos de operación de sistemas de Potencia, así como aspectos de funcionamiento de controles discretos como el Control Automático de Generación. Disparos Automáticos de Carga.

F. Aboytes García, "Control de Voltaje en sistemas Eléctricos de Potencia". En este libro, se tomaron conceptos básicos para el control de voltaje, para poder identificar una condición de inestabilidad de voltaje, ante diferentes condiciones de operación. También se tomó información de utilidad para conocer los diferentes parámetros que intervienen en los elementos que componen un Sistema Eléctrico de Potencia, y conocer los aspectos de potencia reactiva y su comportamiento en diferentes condiciones de demanda, y poder entender los aspectos de transmisión de potencia reactiva y márgenes de potencia reactiva.

Curso, "Control de voltaje y Potencia Reactiva". En este libro, se analizaron aspectos de cargabilidad de líneas de transmisión, se tomaron aspectos importantes relacionados con los compensadores estáticos de Var's, para poder transmitir en este trabajo, el como está compuesto su funcionamiento y su finalidad, también se analizan los dispositivos que nos ayudan a aportar potencia reactiva, así como los que nos absorben potencia reactiva. Este libro nos ayuda a comprender la forma de control de voltaje en estado estable.

IEEE, "Tutorial Course. Reactive Power Basics. Problems and Solutions". En este tutorial, se encontró información fundamental para poder entender aspectos de solución de problemas de flujo de reactivos y control de voltaje, nos brindó un panorama más amplio en el estudio de análisis y operación de sistemas, considerando problemas de potencia reactiva; brindando las bases para la creación de estrategias operativas vigentes.

F. Betancourt Ramírez, F. Aboytes García, "Cargabilidad de Enlaces de Transmisión", De este proyecto de investigación, se tomaron conceptos de cargabilidad de líneas de transmisión, así como aspectos relacionados con las curvas de cargabilidad, aspectos de caída de voltaje, se trata de comprender el aspecto de estabilidad en estado estable, y se toman aspectos relacionados con la cargabilidad en el ámbito de operación y se establecen los límites de estudios para las simulaciones que se analizarán en este trabajo de tesis.

F. Sánchez Tello, R. Ramírez, "Manual Simulador Interactivo de Sistemas de Potencia", Con este manual, se presenta la herramienta principal para el Análisis de Sistemas de Potencia, usando este simulador se logró la creación de estrategias operativas vigentes, que se aplican en la actualidad, para evitar un colapso de voltaje; Y con este manual, se trató de presentar una guía autodidacta, que nos ayude a el manejo del simulador para poder explotar al máximo su capacidad de análisis con ayuda del personal operativo.

CAPÍTULO 3

ANTECEDENTES

3.1 INTRODUCCIÓN

La capacidad de transmisión de los sistemas eléctricos de potencia ha estado limitada tradicionalmente por la estabilidad de ángulo (sincronismo), por límites térmicos o los de cargabilidad. Sin embargo, en las últimas dos décadas con el crecimiento natural de los sistemas de potencia y el incremento en los niveles de demanda, el concepto de capacidad de transmisión de potencia de un sistema tiene que ver también con las condiciones de estabilidad de voltaje que prevalecen en un momento determinado.

Dichas condiciones tienen una dependencia directa con el manejo eficiente de las reservas de potencia reactiva en el sistema. Por estas razones el fenómeno de la estabilidad del voltaje ha cobrado cada vez más interés entre investigadores y especialistas de la industria eléctrica a nivel mundial.

3.2 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN DEL PROBLEMA

Existe una serie de problemas de estabilidad de voltaje reportados en la literatura como los que se presentan a continuación:

- Nueva York, Septiembre de 1970.

- Florida, Diciembre de 1982.
- Francia, Diciembre de 1978, Enero de 1987.
- El norte de Bélgica, Agosto de 1982.
- Suecia, Diciembre de 1987.
- Japón, julio de 1987.

Estos eventos han sido el t3pico de estudio por consultores, e investigadores de universidades alrededor del mundo, dando como resultado reportes t3cnicos de investigaci3n, presentaciones en conferencias, simposiums, y seminarios que han estudiado el problema desde diferentes puntos de vista. C.W. Taylor, P. Kundor, han analizado conceptos establecidos, referentes al problema de la estabilidad de voltaje en los sistemas el3ctricos de potencia, tanto en su aspecto est3tico como en su comportamiento dinámico. Se han propuesto diferentes t3cnicas de an3lisis para el estudio del problema : la dependencia de una condici3n operativa en voltaje (estable o inestable) con respecto al manejo eficiente de las reservas de potencia, reactiva en el sistema, el control de la potencia activa y el impacto de las caracteristicas de la carga ante diferentes niveles de demanda. Se ha reconocido la importancia del modelado de todos los componentes de un sistema el3ctrico de potencia que intervienen en el problema tales como: la m3quina s3ncrona y sus sistemas de control (sistema de excitaci3n sistema de gobernador de velocidad), las caracteristicas de las redes de transmisi3n, la carga de sistema, los enlaces de corriente directa, as3 como los dispositivos para compensaci3n y control de la potencia reactiva y el voltaje.

En nuestro pa3s F. Aboytes ha analizado en detalle el problema del control de voltaje en los sistemas de potencia longitudinales, desde una perspectiva de seguridad operativa.

Su enfoque ha establecido conceptos importantes tales como: los fundamentos de la modulaci3n de componentes para problema de control Q-V, el desarrollo de respuesta del sistema utilizando un modelo incrementa Q-V para obtenci3n de coeficientes de sensibilidad que cuantifican el efecto de cambios en diferentes variables de control, la operaci3n de los compensadores est3ticos de vars (CEV'S) y sus aplicaciones para el control de voltaje, los conceptos relevantes de la utilizaci3n de capacitores serie en

sistemas de transmisión, así como la descripción de estrategias operativas para el control de voltaje y el despacho de potencia reactiva.

Investigadores como N. Yorico, H.Sasaki, A. Funuhashi, F. D. Galiana, M.Kitagawa, han investigado la estabilidad de voltaje en los sistemas eléctricos de potencia ante la presencia de cambiadores de tap automático bajo carga (OLTC'S), calculando éste tipo de inestabilidad de voltaje mediante el desarrollo de criterios de sensibilidad basados en el conocimiento de las características de las carga conectada al sistema, o bien prescindiendo de éstas a partir de los datos de los flujos de potencia, validando sus resultados a través de simulaciones numéricas en sistemas de potencia de prueba, tomando en cuenta las características dinámicas de los OLTC'S y de la carga. Han demostrado que bajo ciertas condiciones tales como las características de la red de transmisión, y la posición de tap de un transformador que se encuentra conectado a un nodo de prueba, el sistema puede encontrar un punto de operación estable en la porción de bajo voltaje de la curva P-V. O bien, como el caso de Heinz Schattler y Jhon Zaborszky, que analizan el fenómeno del colapso de voltaje ante cambios de posición de tap en un transformador conectado a un punto del sistema, presentando la manera en que dicho evento puede ser introducido mediante modelos matemáticos reducidos o simples en las dinámicas de los sistemas eléctricos de potencia, para el análisis de la estabilidad de voltaje.

El problema de la estabilidad de voltaje en los sistemas eléctricos de potencia, considerando las características de la carga, ha sido estudiado en detalle por investigadores como M.K. Pal, estableciendo que cuando existen componentes dinámicos de carga en el sistema, se requiere de su modelación en detalle con el objetivo de analizar los diferentes mecanismos de estabilidad de voltaje ante la presencia de grandes perturbaciones. K. Jimma, K. Vu, C.C.Liu, centran su interés en el modelado dinámico de la carga para el estudio del fenómeno del colapso de voltaje, y D. Karlsson, K.Linder, I. Segerqvist, B. Stenborg, tratan de manera detallada el modelado del consumo de potencia activa y reactiva, en un rango de varios minutos, con respecto a variaciones en el voltaje.

El modelado del fenómeno de colapso de voltaje ha sido analizado en detalle por David J. Hill y Lan A. Hiskens, que proponen un marco de trabajo analítico para el análisis del colapso de voltaje como un fenómeno dinámico, haciendo uso de nuevas funciones de Lyapunov para el análisis de la estabilidad de voltaje ante la presencia de grandes perturbaciones. M.Stubbe, A. Bihain y J. Deuse , C.C.Liu,K. Vu, R. Fishl,J.Chow, analizan de manera individual los diferentes mecanismos que intervienen en la presencia de un colapso de voltaje tales como: la dinámica de la carga, los límites de reactivos, así como los cambios de tap de un transformador bajo carga y la operación de los relevadores. Establecen los efectos de manera combinada para explicar de manera concreta la ocurrencia del fenómeno.

Para los ingenieros, y especialistas de la Industria Eléctrica , el problema de la estabilidad de voltaje ha cobrado gran interés en los últimos años, ya que tiene que ver tanto con la planeación como con la operación del sistema eléctrico..

3.3 PROBLEMÁTICA DE PLANEACIÓN Y PROBLEMÁTICA OPERATIVA.

Desde el punto de vista de planeación la causas principales de los problemas de la estabilidad de voltaje, se tienen básicamente por la insuficiencia de potencia reactiva a suministrar durante periodos de carga altos, con altas pérdidas de potencia reactiva a lo largo de la red de transmisión, y por lo tanto cuando hay niveles de bajo voltaje. Desde el punto de vista de operación, las condiciones de estabilidad de voltaje de un sistema eléctrico de potencia, depende principalmente de los incidentes o contingencias creíbles a ocurrir como: la salida de una o varias unidades de generación, al operar las protecciones de las unidades por la salida de una o varias líneas de transmisión ante la presencia de cualquier falla, o bien la conexión de un incremento de carga, pronosticado durante periodos de demanda alta.

De esta manera, tanto los encargados de la planeación como los operadores del sistema, están interesados en la investigación de la estabilidad del voltaje,

principalmente con el objetivo de determinar los límites de transmisión de potencia por estabilidad de voltaje, y los márgenes de aproximación a la inestabilidad de voltaje, buscando condiciones de operación segura para el sistema.

Por mucho tiempo, se pensó que el límite de estabilidad era igual al límite de máxima transferencia de potencia entre áreas y/o líneas críticas. Esto significa que el límite de estabilidad de voltaje debería de coincidir con la “nariz” de la curva característica de sistema P-V. Muchos de investigadores durante varios años han tratado de encontrar este punto “nariz” mediante el uso de diferentes conceptos y metodologías. Sin embargo, los estudios convencionales no han considerado las características de la carga, como una componente importante del sistema para el problema. La carga es usualmente considerada con características de potencia constante en los estudios de flujos, lo que implica que el consumo de potencia en un nodo de carga es constante, independientemente de las variaciones de la frecuencia y del voltaje. Sin embargo, partiendo de que la estabilidad de voltaje depende directamente del balance de potencia reactiva entre el suministro y la carga, la demanda en un nodo es fuertemente afectada por la magnitud del voltaje y por las características de la carga. De esta forma, el límite de estabilidad de voltaje debe de ser reconsiderado, incluyendo las características de la carga existentes en un sistema eléctrico de potencia.

Por lo tanto, en el análisis para la determinación del límite de estabilidad de voltaje en un sistema de potencia, se debe de hacer énfasis en la modelación y las características de la carga existente, para que los ingenieros de planeación, como los operadores de sistema tenga una mejor comprensión del problema que enfrentan en un momento determinado.

3.4 RESUMEN

En este capítulo se ha tratado los antecedentes que han motivado a diferentes investigadores a estudiar el problema de inestabilidad de voltaje en los Sistemas Eléctricos de Potencia, y que han asentado las bases para futuras investigaciones con respecto al tema, tomando en cuenta diferentes aspectos de la carga, límites de transmisión, y criterios de sensibilidad de voltaje. Presentando el porqué este problema ha adquirido una mayor importancia como tópico de estudio e investigación para consultores e investigadores de distintas universidades en el mundo, así como para los ingenieros, y especialistas de la Industria Eléctrica, tanto en el área de planeación como en la operación. Se menciona también el conjunto de técnicas especiales propuestas en la literatura para el análisis de estabilidad del voltaje ante la presencia de grandes y pequeña perturbaciones. Posteriormente se mencionan las características de sistema P-V, estableciendo su potencial como herramientas de análisis para la determinación de las condiciones de la estabilidad de voltaje en un sistema de potencia para cierta condición de operación o bien ante la presencia de cualquier contingencia, planeando las ventajas y desventajas en su aplicación. Por último se mencionan de manera concreta los objetivos principales para este trabajo de investigación.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO 4

CONCEPTOS GENERALES DE CONTROL DE VOLTAJE

4.1 INTRODUCCIÓN

El problema de la estabilidad de voltaje en los sistemas eléctricos de potencia incluyen a la generación, la transmisión y la distribución. El problema está fuertemente asociado con otros aspectos de estado estable y con el comportamiento dinámico de los sistemas eléctricos de potencia; así, se puede mencionar: el control de voltaje, la compensación de potencia reactiva y el manejo de la misma, la operación de los esquemas de protección del sistema, y el comportamiento de la carga. Todos ellos tienen influencia sobre la estabilidad de voltaje. De esta manera, es de gran interés identificar y analizar las diferentes dinámicas de todos estos factores, y así lograr implementar metodologías de control que aseguren la estabilidad de voltaje ante la presencia de cualquier contingencia del sistema

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El objetivo del presente capítulo es el explicar el problema de estabilidad de voltaje en los sistemas eléctricos de potencia para lo cual se tratarán los conceptos y aspectos relacionados con el tópico.

4.2 ESTABILIDAD DE VOLTAJE

Cuando se habla de estabilidad de voltaje se entiende de manera general la capacidad de un sistema eléctrico para mantener su nivel de voltaje dentro de una banda operativa

establecida, a todos los voltajes nodales supervisados del sistema, tanto durante como después de que se presenta un disturbio.

4.3 INESTABILIDAD DE VOLTAJE

Análogamente se hace referencia a la inestabilidad de voltaje, cuando después de la presencia de un disturbio, uno o todos los voltajes nodales del sistema de potencia tocan un valor fuera de la banda operativa establecida, pudiendo presentarse el caso de dinámica de inestabilidad controladas o no, por el conjunto de dispositivos de control de voltaje que se encuentren distribuidos en el sistema.

Las causas por las cuales se presenta una condición de inestabilidad de voltaje apuntan principalmente a la incapacidad del sistema para suministrar la cantidad de potencia reactiva solicitada por la carga, o bien por una absorción excesiva de potencia reactiva por parte del sistema, ante la presencia de una contingencia. Así el problema de inestabilidad de voltaje puede identificarse, de manera general, como un problema de balance de potencia reactiva, el cual está fuertemente ligado con el comportamiento de la carga conectada al sistema.

Las causas principales que originan una condición de inestabilidad de voltaje son las que a continuación se mencionan:

1. Incapacidad del sistema eléctrico de potencia para suministrar a la carga la cantidad de potencia reactiva demandada, bajo una condición de operación dada.
2. Grandes bloques de potencia transmitidos por líneas de transmisión largas
3. Fuentes de voltaje/reactivos alejadas de los consumo
4. Reservas de reactivos insuficientes ante acciones inefectivas de control de voltaje mediante el uso de transformadores con cambio de tap bajo carga.
5. Características de respuesta no favorable de las componentes de carga.
6. Coordinación inadecuada del control de voltaje en el sistema

7. Compensación en derivación excesiva en el sistema.

4.4 FLUJO DE REACTIVOS—CONTROL DE VOLTAJE

Es común en la literatura asociar el problema de voltaje con la circulación de potencia reactiva. Esto se puede mostrar analizando el circuito de la Fig.4.1

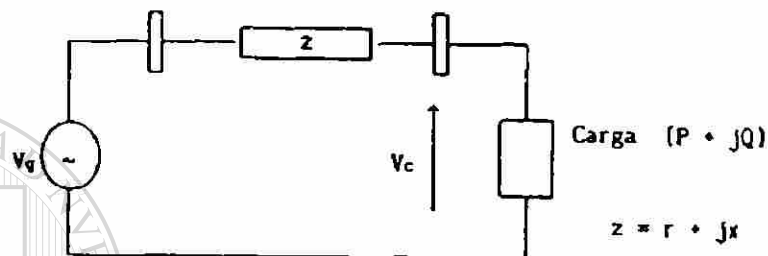


Fig. 4.1 Circuito básico

Si en la Fig. 4.1 se considera que la carga consume sólo potencia activa, entonces el diagrama fasorial que relaciona el voltaje de generación (V_g) y el de carga (V_c) es el mostrado en la Fig. 4.2

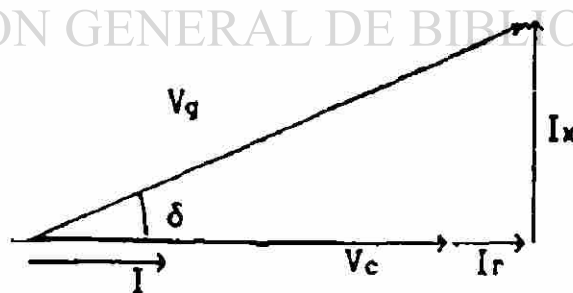


Figura 4.2.

La relación entre la corriente y la potencia de carga se expresan en la ecuación (4.1). en todos los desarrollos se utilizan magnitudes de corriente y voltajes.

$$I = \frac{P}{V_c} \quad (4.1)$$

La relación entre voltajes se obtiene del diagrama fasorial de la fig. 4.2

$$V_g^2 = (V_c + Ir)^2 + (Ix)^2 \quad (4.2)$$

Substituyendo la ecuación (4.1) se obtiene:

$$V_g^2 = \left(V_c + \frac{P}{V_c} r \right)^2 + \left(\frac{P}{V_c} X \right)^2 \quad (4.3)$$

En (4.3) se observa que las caídas de voltaje en fase y en cuadratura con V_c dependen de los valores de resistencia y reactancia del elemento de transmisión. Como generalmente la relación r/x es baja en sistemas de transmisión, la componente en fase será pequeña. Por otro lado, la componente en cuadratura no cambia significativamente la magnitud de V_c . Sólo causa el defasamiento entre voltajes. De esta forma:

$$\delta \approx \frac{P}{V_c V_g} X \quad (4.4)$$

Y la caída de voltaje para ángulos pequeños es;

$$\Delta V \approx \frac{P}{V_c} r \quad (4.5)$$

el análisis de las ecuaciones (4.4) y (4.5) muestra:

- Que la carga activa afecta en mayor grado al defasamiento entre voltajes
- El cambio en la magnitud del voltaje depende del valor de la carga, pero su efecto se reduce debido al valor de la resistencia.

Otro aspecto importante que se debe observar aún cuando la carga no consume potencia reactiva, el generador si está aportando reactivos al sistema. Esto se observa del diagrama de la Fig. 4.2 con el voltaje V_g adelantado respecto a la corriente de carga. Aquí, la potencia reactiva que se inyecta en el extremo de envío se consume en la reactancia del sistema de transmisión, causando una caída de voltaje (I_x) en cuadratura con el voltaje de carga.

Un caso que ilustra el efecto del flujo de reactivos que tiene cuando la carga demanda potencia reactiva inductiva (factor de potencia atrasado).

El diagrama fasorial para este caso se muestra en la Fig. 4.3

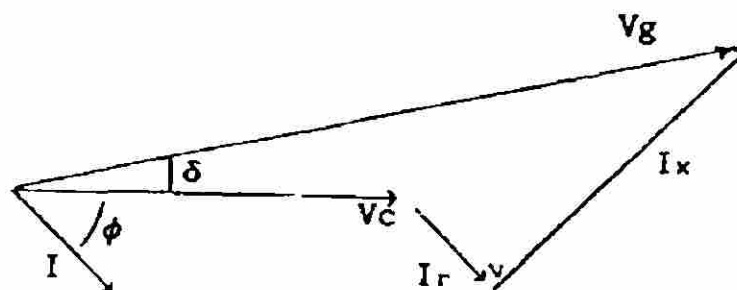


Figura 4.3. Diagrama fasorial para carga con factor de potencia atrasado

La relación entre voltaje y corriente en la carga es la siguiente:

$$\frac{P}{V_c} = I \cos \phi \quad (4.6)$$

$$\frac{Q}{V_c} = I \sin \phi \quad (4.7)$$

del diagrama fasorial de la fig. 4.3 se obtiene la relación entre voltajes.

$$V_g^2 = \left\{ V_c + (I \cos \phi) r + (I \sin \phi) X \right\}^2 + \left\{ (I \cos \phi) X - (I \sin \phi) r \right\}^2$$

la expresión final se determina utilizando (4.6) y (4.7)

$$V_g^2 = \left(V_c + \frac{P}{V_c} r + \frac{Q}{V_c} x \right)^2 + \left(\frac{P}{V_c} X - \frac{Q}{V_c} r \right)^2 \quad (4.8)$$

Al analizar la ecuación (4.8) y la fig.4.3 se concluye que la componente en fase con el voltaje de carga es la que tiene mayor efecto en la caída de voltaje del punto de generación a la carga.

$$\Delta V \approx \frac{P}{V_c} r + \frac{Q}{V_c} x \quad (4.9)$$

En (4.9) se observa a su vez que la demanda de potencia reactiva tiene mayor efecto en el cálculo de ΔV debido a que está multiplicada por la reactancia del elemento de transmisión.

Comparando los términos en (4.9) se obtiene:

$$\Delta V = \frac{P}{V_c} r = \frac{Q}{P} \left(\frac{x}{r} \right) \quad (4.10)$$

De aquí a medida que la relación $\frac{x}{r}$ aumenta (sistemas de transmisión en alta tensión) y que el factor de potencia difiere más de la unidad, el efecto de la corriente reactiva es mayor en el cambio de voltaje.

Analizando el diagrama de la fig.4.3 se observa que el ángulo entre el voltaje de generación y la corriente es $(\Phi + \delta)$. Lo cual indica que el generador opera con un factor de potencia más atrasado que el de la carga. En este caso se debe generar y transmitir la potencia reactiva de la carga y la potencia reactiva que consume el sistema de transmisión.

Otra condición operativa de interés se tiene cuando la carga en la fig.4.1 sólo consume potencia reactiva inductiva. La relación fasorial para esta caso se muestra en la fig.4.4 .

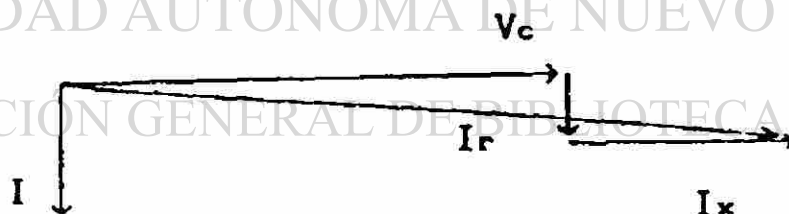


Fig. 4.4. Diagrama fasorial para carga reactiva inductiva

Del análisis de las condiciones mostradas en la fig. 4.4 se obtiene:

$$\Delta V = \frac{Q}{V_c} x \quad (4.11)$$

Donde se aprecia el gran impacto de la corriente reactiva en la caída de voltaje, en este caso prácticamente en fase con el voltaje V_c .

Comparando las ecuaciones (4.59 y (4.11) que representan los casos extremos de tener una inyección activa y reactiva respectivamente, se observa que el mayor impacto de la inyección reactiva (4.11) es debido a la reactancia del elemento de transmisión, de esta forma la ecuación (4.11) es el término dominante en la caída de voltaje. En el caso general la ecuación (4.9) define las contribuciones de cada componente de la carga.

4.5 CONTROL DE VOLTAJE LOCAL

De acuerdo a los conceptos básicos presentados se puede decir que el problema básico para evitar la degradación del perfil de voltaje es eliminar o reducir el flujo de potencia reactiva en el sistema. Sin embargo, en sistemas reales las fuentes de reactivos no necesariamente están cerca de la carga, de ahí que se requiere cierto transporte de potencia reactiva.

La primera fase en el control de voltaje es tener nodos de voltaje controlados que definan en forma general el perfil de voltaje del sistema. Este control de voltaje es de tipo local y trata de mantener el voltaje de un nodo en un valor especificado. Esto se logra a través de cambios en la inyección de potencia reactiva, mediante la acción del sistema de excitación de generadores o la conexión continua de reactores o capacitores, en el caso compensadores estáticos de var's.

En la Fig. 4.5 se presenta un esquema de control local típico

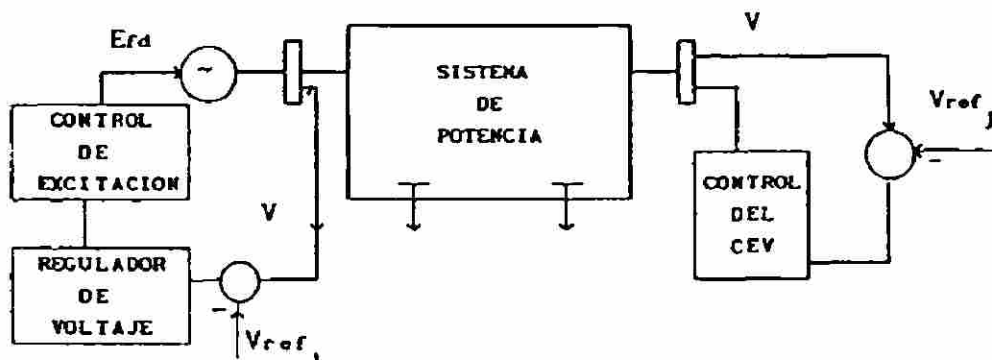


Fig. 4.5. Control de voltaje local

Si el esquema de control mostrado en la Fig. 4.5 se aplica en diversos puntos del sistema se tendrá la estructura básica que definirá el flujo de reactivos en la red. En forma esquemática la Fig.4.6 muestra como los nodos de voltaje controlados sirven de referencia (soporte) al perfil de voltaje del sistema.

Es importante señalar que en estado estable los controles mantendrán el voltaje del nodo controlado en el valor especificado. En cambio, ante perturbaciones, se tendrán cambios en los voltajes y el regreso a los valores de referencia dependerá de la respuesta dinámica del sistema de excitación, de la respuesta del control de CEV'S y de la inercia electromagnética de generadores.

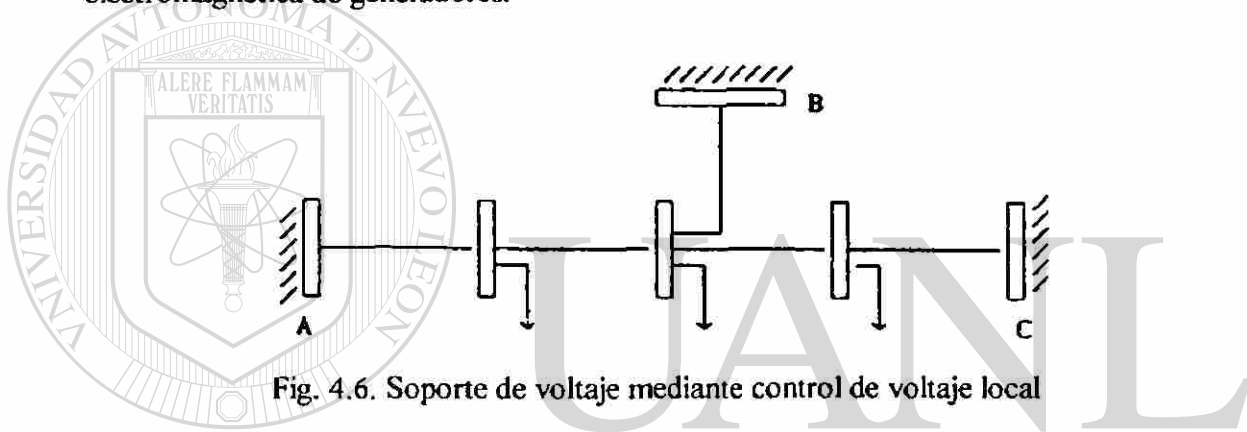


Fig. 4.6. Soporte de voltaje mediante control de voltaje local

En la Fig.4.6 los nodos A, B Y C son de voltaje controlado y mantienen el nivel de voltaje aportando la potencia reactiva requerida por las cargas del sistema de transmisión.

En un caso real las fuentes de reactivos son limitadas y sólo podrán mantener el voltaje mientras los requerimientos de potencia reactiva del sistema estén dentro de la capacidad de la fuente. Si se llega a un límite, se pierde el soporte de reactivos y el control de voltaje en la zona donde se localiza la fuente.

De esta manera, en un sistema de potencia es muy importante la localización de las fuentes de reactivos, el objetivo en la ubicación es tratar de lograr un soporte de voltaje adecuado y reducir la transmisión de potencia reactiva a los puntos de carga.

Si, por otro lado, se tienen pocas fuentes de potencia reactiva y están alejadas eléctricamente de la carga, entonces se tendrá la degradación del perfil de voltaje debido a la transmisión de reactivos a grandes distancia. Se debe resaltar que éste es un problema acumulativo, ya que al tener mayores diferencias de voltaje también se incrementa el consumo de reactivos en los elementos de transmisión. Lo que a su vez causa una caída de voltaje mayor.

4.6 BALANCE DE POTENCIA REACTIVA

En un sistema de potencia los nodos de voltaje controlados actúan como compensadores de potencia reactiva, suministrando los reactivos necesarios, de acuerdo a las variaciones de la demanda, a manera de mantener el voltaje especificado (referencia).

La aportación de reactivos de las fuentes dependerá del voltaje de referencia que se controla. Así por ejemplo, si se incrementa el voltaje interno del generador, como resultado de un cambio en la corriente de campo, se tendrá un caso como el que se muestra en el diagrama fasorial de la Fig. 4.7

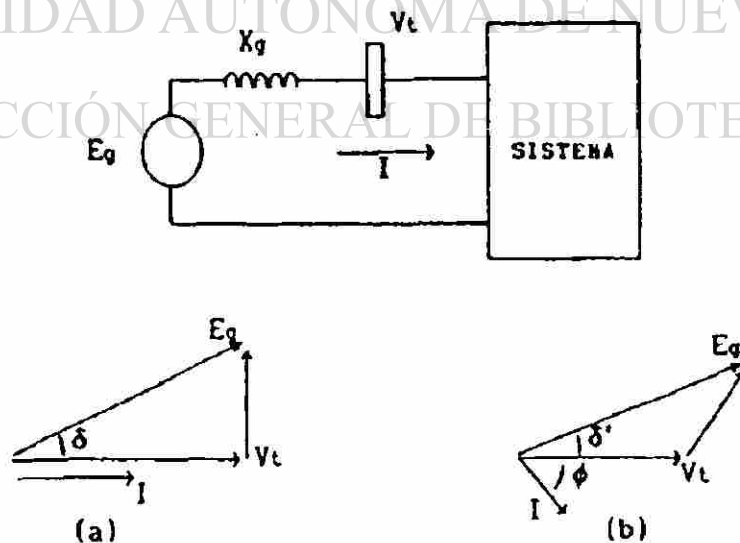


Fig. 4.7 Cambio en la excitación el Generador

En la Fig. 4.7a se presenta la condición antes del cambio: se tiene un factor de potencia unitario en terminales, sin embargo, internamente se tiene una inyección de potencia reactiva (corriente I atrasada con respecto al E_g) que se consume en la reactancia del generador. Esta es la condición que define el límite entre la sobre o sub excitación de un generador.

En la fig. 4.7b se presenta el diagrama fasorial después de un cambio en la demanda de reactivos en el sistema, se mantiene la potencia activa sin cambio y el voltaje terminal constante. En este caso, a través del sistema de excitación se incrementa la corriente de campo, y el voltaje interno de la máquina, y para mantener la potencia activa constante se ajusta el ángulo δ a δ' . Esta relación entre la corriente (I) y voltaje interno (E_g) es el mecanismo compensador para la potencia reactiva.

En la Fig. 4.7b se observa que de la inyección (interna) de potencia reactiva de la máquina, parte se consume en la reactancia del generador y parte se inyecta al sistema (corriente atrasada con respecto al voltaje terminal). En este caso la máquina está sobreexcitada, ya que suministra los requerimientos internos del generador y los del sistema.

Un análisis similar se puede realizar cuando se modifica el voltaje de referencia de un generador, manteniendo el resto de los generadores del sistema sin cambio. Para ilustrar éste comportamiento se utiliza el sistema y diagrama fasorial de la fig. 4.8.

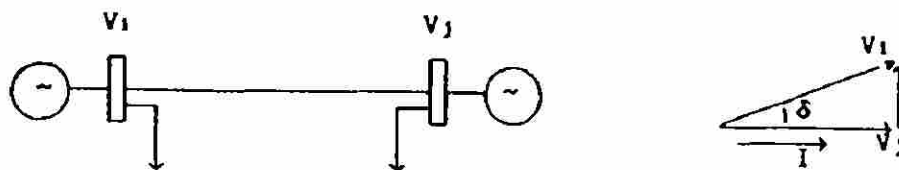


Fig. 4.8. Sistema elemental para analiza el efecto de cambios en voltaje de generación

En el diagrama fasorial de la fig. 4.8 se observa que la máquina *i* entrega potencia activa y reactiva al sistema, en cambio en el nodo *j* solo se recibe potencia activa a través de la línea de transmisión.

Si se incrementa el voltaje V_i y se mantiene la potencia activa sin cambio, entonces se debe ajustar el ángulo δ para mantener la potencia activa (p).

$$P = \frac{V_i V_j}{X_{ij}} \text{sen} \delta' \quad (4.12)$$

$$\text{sen} \delta' = \frac{PX}{V_i V_j} \quad (4.13)$$

Como el denominador en (4.13) crece, el ángulo δ' debe ser menor que δ . De esta manera, la corriente debe de ajustar en magnitud y fase para cumplir con la potencia activa transmitida y con la relación de voltajes. En este caso la componente de la corriente en fase con el voltaje V_j debe ser la misma que antes del cambio.

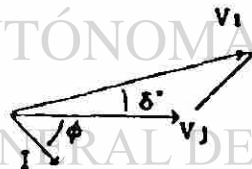


Fig. 4.9. Diagrama fasorial para analizar el cambio en el voltaje de generación V_i

En la Fig. 4.9 se observa que la inyección de potencia reactiva en el nodo *i* aumenta, ya que crece la magnitud de V_i , la corriente I y el ángulo entre estos fasores. Por otro lado, en el nodo *j* se recibe potencia reactiva del sistema de transmisión, la cual se consume en la carga o la debe absorber el generador en ese nodo.

El resultado de modificar el voltaje de generación, es un cambio en el flujo de reactivos. Se tendrá un intercambio de potencia reactiva entre generadores, y como consecuencia se altera el perfil de voltaje del sistema. La efectividad del cambio (mejoramiento del perfil de voltaje) dependerá de que se reduzca el flujo de reactivos en las trayectorias de mayor impedancia.

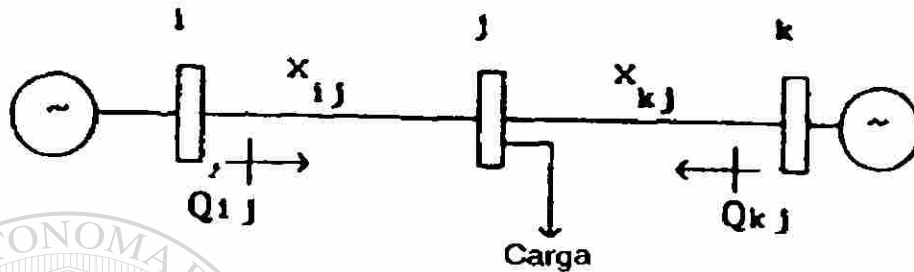


Fig. 4.10. Sistema de potencia elemental

En forma natural se tiene la tendencia a suministrar la potencia reactiva requerida por la carga a través de las líneas con menor impedancia. Esto se puede mostrar utilizando las ecuaciones del flujo de potencia reactiva en el sistema.

$$Q_{ij} = \frac{V_i}{X_{ij}} (V_i - V_j \cos \delta_{ij}) \quad (4.14)$$

$$Q_{kj} = \frac{V_k}{X_{kj}} (V_k - V_j \cos \delta_{kj}) \quad (4.15)$$

Si se considera que los voltajes de generación ($V_i = V_k$) y las diferencias angulares ($\delta_{ij} = \delta_{kj}$) son iguales, entonces;

$$\begin{aligned} Q_{ij} &= X_{kj} \\ Q_{kj} &= X_{ij} \end{aligned} \quad (4.16)$$

La ecuación (4.16) muestra que la relación de flujos reactivos dependerá de las reactancias de las ramas. Así, si $X_{kj} = 4X_{ij}$, el flujo Q_{ij} será 4 veces mayor que el flujo Q_{kj} .

De esta forma, a medida que la reactancia del elemento de transmisión es mayor, el flujo de reactivos disminuye. La distribución del flujo de reactivos trata de lograr el equilibrio de voltaje en el nodo j , la ecuación (4.16) también se puede escribir en forma aproximada como una caída de voltaje.

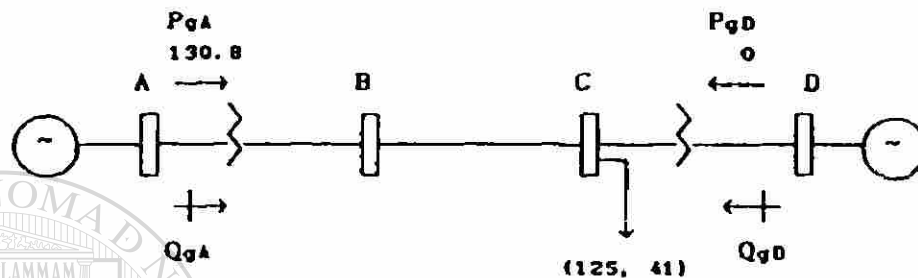
$$\Delta V = \frac{Q_{ij}X_{ij}}{V_i} = \frac{Q_{kj}X_{kj}}{V_k} \quad (4.17)$$

En forma alterna se puede decir, que al aumentar la demanda de potencia reactiva en el nodo J , ésta se obtendrá en mayor proporción de la fuente de reactivos más cercana eléctricamente a la carga, de manera de tener la menor desviación de voltaje en el nodo J .

Un análisis interesante es la evaluación del efecto de incrementar el voltaje en la fuente de reactivos más alejada de la carga. En este caso, el control es opuesto a la tendencia natural, ya que se estaría forzando un flujo de reactivos a través de una trayectoria de alta impedancia. La conclusión es que esta acción no es efectiva, ya que el incremento en la aportación de reactivos en la fuente se consumirá en la reactancia de la línea de transmisión.

La acción de control recomendada sería modificar el voltaje de la fuente de reactivos más cercana a la carga, a manera de aumentar el flujo por la trayectoria natural de carga y al mismo tiempo descargar las trayectorias de alta impedancia. El resultado es un efecto positivo en el control de voltaje en el nodo de carga.

En la Fig. 4.11 se presenta un sistema donde se realizan cambios en el voltaje de generación, se incluyen resultados de casos que muestran el comportamiento del flujo de potencia reactiva y voltajes en el sistema. Es importante observar el efecto en la distribución de potencia reactiva, y en la efectividad del cambio de voltaje en el nodo de carga.



	V_A	V_B	V_C	V_D	Q_{gA}	Q_{gD}
Caso 1	1.0	0.987	0.946	1.0	21.8	43.1
Caso 2	1.0	1.003	0.987	1.05	7.9	53.6
Caso 3	1.05	1.027	0.964	1.0	29.3	28.9
Caso 4	1.05	1.044	1.005	1.05	15.1	38.4

Fig. 4.11 Comportamiento del sistema con diferentes voltajes de generación

4.6.1 INYECCIONES DE POTENCIA REACTIVA

Hasta el momento sólo se han considerado fuentes de reactivos como nodos de voltaje controlados. En algunos casos se pueden tener elementos pasivos que consumen o generan potencia reactiva en función del voltaje del punto donde se conecta. En cualquier situación la idea básica es la misma, la fuente variable de reactivos suministrará las necesidades de potencia reactiva en nodos cercanos, tratando de evitar el viaje de potencia reactiva en los mismos, tratando de evitar el viaje de potencia reactiva

desde puntos alejados. Este es el caso de capacitores y reactores, que alteran el balance nodal de potencia reactiva y causan cambios en la distribución de flujos reactivos, en la generación de potencia reactiva en nodos de voltaje controlado, y como consecuencia en el perfil de voltaje del sistema.

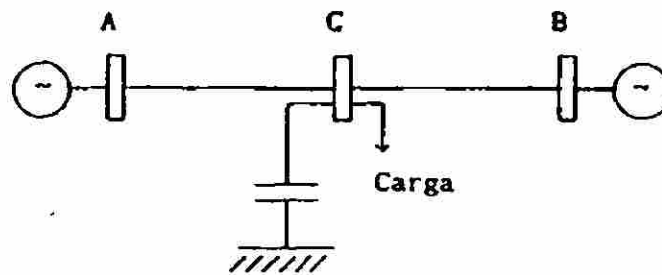


Fig. 4.12 Inyección de Potencia reactiva en nodo de carga

En la Fig. 4.12 la demanda de reactivos de la carga será suministrada parcialmente por el capacitor en el punto de carga y sólo la diferencia, en su caso, deberá obtenerse de los generadores. De acuerdo a la ecuación (4.17), al reducir el flujo de reactivos se mejorará el voltaje del nodo de carga.

El análisis anterior permite extrapolar el efecto de una inyección de reactivos, la cual trata en forma natural de evitar la circulación de potencia reactiva. Si en cada punto del sistema se logra el balance de potencia reactiva (se genera y se consume lo necesario), se tendrá un perfil plano de voltaje, con pequeñas variaciones debidas a la caída por efecto de resistencia. El análisis de sistemas de transmisión y esquema de compensación reactiva.

4.7 COORDINACIÓN DE CAMBIOS

En el problema de control de voltaje es muy importante seleccionar los voltajes de referencia en los nodos de voltaje controlado e manera de mantener un perfil de voltaje lo más uniforme posible.

Esta acción de coordinación se realiza tratando de mantener un nivel de reserva de reactivos, o bien minimizando el flujo de reactivos en el sistema. En sí este es un proceso de optimización, que trata de lograr un perfil de voltaje en un rango operativo y al mismo tiempo obtener el mejor valor de la función objetivo

Por otro lado, siendo el control de voltaje un problema de naturaleza local, es posible formular varios problemas de control de acuerdo a la estructura del sistema. Esto se basa en que la acción de controles sólo será efectiva si se realiza en puntos cercanos a los nodos con problemas de voltaje.

Para simplificar el problema en cada subsistema, se puede seleccionar un nodo que servirá de indicador del nivel de voltaje en el subsistema. El objetivo en éste caso es determinar la acción de control para mantener el voltaje en este nodo en una banda seleccionada.

4.7.1 FLUJOS DE POTENCIA REACTIVA – PÉRDIDAS ACTIVAS

En secciones anteriores se ha mostrado la relación entre el flujo de potencia reactiva y la caída de voltaje. Aquí se tratará de asociar ahora el flujo de reactivos con las pérdidas de potencia activa.

En el análisis se considera el sistema de la Fig. 4.13

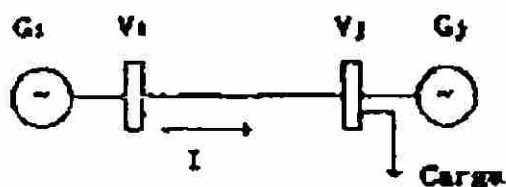


Fig. 4.13 Análisis de pérdidas de transmisión

Se considera que por la línea de transmisión (nodo j) se recibe una potencia activa y cero potencia reactiva. Los nodos i y j son de voltaje controlado. El diagrama fasorial correspondiente se muestra en la Fig. 4.14

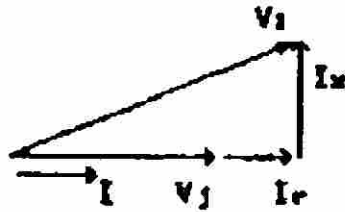


Fig. 4.14. Diagrama fasorial para el caso base

Si se incrementa el voltaje V_i y se mantiene constante la potencia activa de la carga y el voltaje V_j , se alterará la distribución de reactivos en el sistema y por consiguiente la corriente. En la Fig. 4.15 se presenta el diagrama fasorial con el cambio de voltaje.

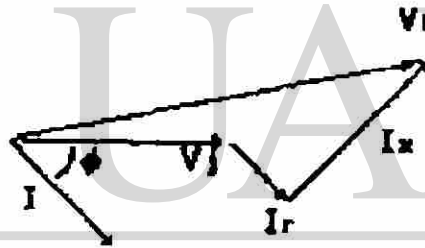


Fig. 4.15 Efecto del cambio en el voltaje V_i

El análisis de la Fig. 4.15 indica que la magnitud de la corriente debe crecer para mantener la misma componente de corriente en fase V_j , esto de manera de cumplir con la restricción de potencia activa. Al tener una corriente mayor se incrementan las pérdidas de potencia activa ($I^2 r$).

En éste caso las pérdidas activas las proporcionará el generador G_i , ya que el generador G_j tiene una aportación fija de potencia activa a la carga. El balance nodal en éste caso es el siguiente.

$$P_{CARGA} = P_{Gj} + P_{LINEA}$$

En cuanto a la potencia reactiva, ahora en el nodo j se recibe potencia reactiva que se consumirá en la carga o se tendrá que absorber en el generador G_j .

Si el voltaje V_i se reduce se tendrá la situación que muestra en el diagrama de la fig. 4.16.

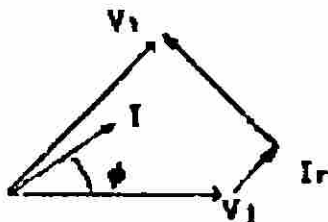


Fig. 4.16. Efecto de la reducción del voltaje V_i

En éste caso nuevamente la magnitud de la corriente aumenta para mantener la restricción de la potencia activa y las relaciones de voltaje, produciendo un incremento en las pérdidas de potencia activa.

La expresión analítica de las pérdidas activas (P_p) se puede obtener sumando el flujo de potencia activa de i a j y de j a i , el resultado se presenta en la ecuación (4.18)

$$P_p = \frac{r}{r^2 + x^2} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \delta_{ij}) \quad (4.18)$$

Si solo se considera V_i como variable, la condición de pérdidas mínimas se obtiene derivando (4.18) en respecto a V_i e igualando a cero.

$$\frac{dP_p}{dV_i} = \frac{r}{r^2 + x^2} (2V_i - 2V_j \cos \delta_{ji}) \quad (4.19)$$

Simplificando (4.19) se obtiene;

$$I_i - I_j \cos \delta_{ij}$$

De (4.19) se concluye que para diferencias angulares pequeñas, las pérdidas se minimizan cuando las magnitudes de voltaje son iguales.

En un caso general se puede decir que con perfil uniforme de voltaje se reduce el flujo de reactivos y como consecuencia se minimizan las pérdidas de potencia activa en la transmisión.

Lo anterior es una justificación adicional para tratar de mantener los voltajes del sistema dentro de una banda operativa. En este caso la implicación es económica ya que se debe generar más potencia activa para suministrar la misma carga activa.

4.7.2 MARGEN DE POTENCIA REACTIVA

Uno de los aspectos importantes a considerar cuando se realizan cambios en los voltajes de las fuentes de reactivos, es la reserva de potencia reactiva disponible en cada nodo controlado.

Aquí lo importante es tener siempre disponible potencia reactiva para contrarrestar los cambios normales de la carga o cambios en el sistema de transmisión ocasionados por contingencias. Si como resultado de las acciones de control, tratando de mejorar el perfil de voltaje, se reduce la reserva de reactivos en una zona, se corre el riesgo de perder el control de voltaje en esa parte del sistema al no disponer del soporte reactivo necesario ante posibles cambios.

De acuerdo a los principios presentados anteriormente, la potencia reactiva se debe tener disponible lo más cerca (eléctricamente) posible de la demanda, de esta forma el concepto de reserva sólo tiene significado en forma local. En el caso de una reserva de reactivos remota se tendrá la circulación de potencia reactiva en grandes distancias y en consecuencia la degradación del perfil de voltaje.

Se debe tener presente que la coordinación de voltajes en un sistema involucra criterios preventivos de seguridad. Siempre será necesario estar adelante del sistema. De manera de anticipar cambios posibles en la distribución de reactivos.

Un caso típico se tiene cuando los generadores de un sistema empiezan a incrementar su aportación de reactivos como resultado de la entrada de carga a la hora pico, reduciendo el margen de reactivos disponible. Esta situación se puede anticipar efectuando cambios en los voltajes de referencia, de manera de descargar las fuentes de reactivos y esperar la hora de cara máxima. Un aspecto interesante es que algunos casos no será posible modificar el perfil de voltaje cuando la carga está en el máximo debido que muchos generadores están muy cerca del límite de reactivos.

4.8 ASPECTOS BÁSICOS PARA EL ANÁLISIS DE CARGABILIDAD.

Los sistemas eléctricos de potencia en países en vías de desarrollo están constituidos por un reducido número de líneas que unen centros de generación distantes de los centros de consumo (como el caso de México), a este tipo de sistemas se les llama Sistemas Eléctricos longitudinales.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Una de las características técnicas principales de Sistemas Eléctricos débiles o longitudinales es su configuración radial que se refleja en niveles de bajo corto circuito lo cual permite variaciones de voltaje en magnitud y ángulo considerables cuando hay cambios de configuración y aún con el cambio de demanda y flujos de potencia.

Entre los problemas técnicos más relevantes en la operación del Sistema Eléctrico Nacional, es el control de voltaje para las diferentes condiciones operativas. La topología del sistema y la localización de las fuentes de reactivos son aspectos fundamentales en el problema de control de voltaje.

La red del Sistema Eléctrico Nacional debido a sus características de longitudinalidad presenta serias dificultades para su operación. No es posible establecer reglas para definir la capacidad de transferencia de potencia (cargabilidad) de una línea de transmisión (LT) o de una red. Se puede decir que la característica de cargabilidad de una red es tan dinámica como el sistema mismo.

Al igual que los desbalances de potencia activa, los desbalances de potencia reactiva pueden conducir a condiciones de operación inestables y en casos críticos al colapso de voltaje.

Debido a lo anteriormente expuesto, la operación del Sistema Eléctrico de Potencia no es sencillo y es necesario que se tengan muy claros los conceptos que en este tema se tratan.

4.8.1 LIMITACIÓN TÉRMICA

El límite térmico está determinado por la máxima temperatura del conductor. La temperatura de éste afecta la flecha entre las torres y la pérdida de la resistencia a la tensión mecánica debido al reconocimiento que puede sufrir si la temperatura es muy alta. Con ello podrían violarse las distancias a tierra permisibles, o bien podría excederse el límite de elasticidad del conductor, con lo cual ya no recuperaría su longitud original cuando se enfriara. La temperatura del conductor depende de la magnitud de la corriente y de su duración así como de la temperatura ambiente, velocidad del viento y de las condiciones físicas en la superficie del conductor. Ya que este límite resulta de la producción de calor por las pérdidas del óhmicas, la constante de tiempo térmica es de varios minutos; se puede hablar entonces de una capacidad o límite térmico de corto plazo y otra de largo plazo.

Para líneas de alto voltaje en adelante, las consideraciones ambientales, tales como el efecto corona y los efectos de campo, obligan a que el diseño de líneas resulte en capacidades térmicas elevadas. La capacidad térmica cuando se tiene varios conductores

por fase, en especial en los niveles de alto voltaje generalmente excede por un margen significativo los requerimientos del sistema para transferir potencia a través de una línea específica. En tales casos, el equipo terminal de la línea, tal como las trampas de onda, o el equipo de subestación presentan un límite térmico mas restrictivo que la línea misma.

4.8.2 CAÍDA DE VOLTAJE

La limitación de caída de voltaje es de suma importancia, sobre todo en sistemas eléctricos de longitudinales, está íntimamente relacionada con la capacidad de suministro de reactivos en los extremos terminales de la línea. Con base en el modelo simplificado de la fig (4.17), la caída de voltaje se define en el nodo de recepción y se supervisa observando el voltaje V_R . El criterio usual es de permitir una caída de 5% la cual puede aparecer como muy estricta; sin embargo, es muy importante recordar que se está utilizando para estudios de planificación donde se tienen importantes en cuanto a la evolución de la oferta y la demanda futuras. Sin embargo, se pueden realizar estudios paramétricos para cuantificar el aumento de cargabilidad al degradar, digamos a un 7.5% la caída de voltaje permisible.

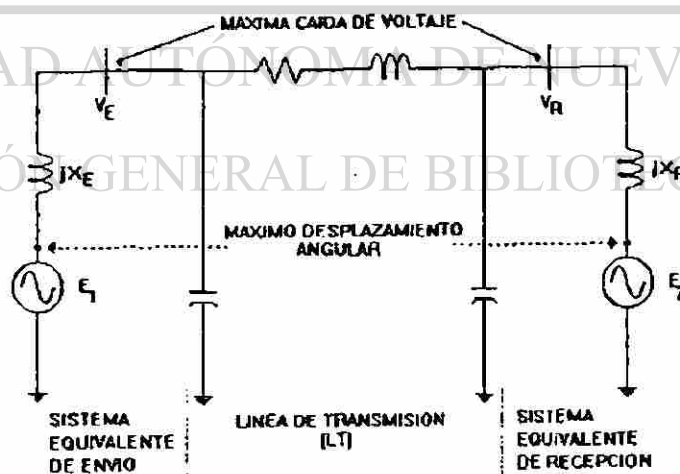


Fig. 4.17. Modelo para análisis de cargabilidad en Lt.

4.8.3 MARGEN DE ESTABILIDAD DE ESTADO ESTABLE (ME)

La limitación de estabilidad se refiere al margen entre la potencia máxima (P_{max}) y la potencia de operación permisible (P_{op}) fig. (4.18). El ME se define en términos de P_{max} . Y P_{op} .

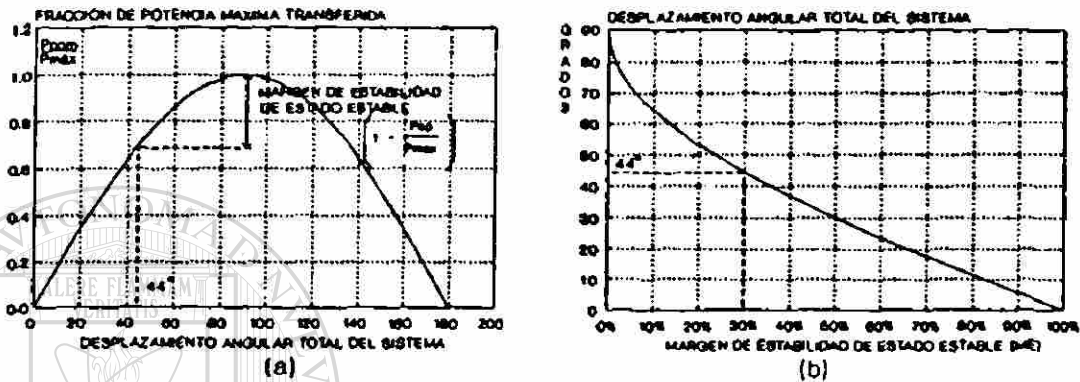


Fig. 4.18 a) Curva del ángulo-potencia

b) Conversión del ME a desplazamiento Angular

Este margen se selecciona para proporcionar un funcionamiento estable del sistema ante una variedad de contingencias que pueden provocar cambios de carga transitoria y de régimen permanente en la línea. Estos cambios pueden ser provocados por maniobras de apertura y cierre en líneas y transformadores, por cambios en el despacho de generación o por disturbios eléctricos, tales como fallas o pérdidas de generación.

El nivel del margen se basa en el juicio y en la experiencia de los sistemas existentes, así como en los criterios de planificación que se siguen, específicamente los referentes a la confiabilidad con que se planifican los sistemas. Generalmente, se utiliza un margen de 30% a 35%, lo que significa una separación angular entre E1 y E2 de 44°-40° (véase fig.). Obsérvese que dicha separación angular se refiere al sistema completo; esto es, desde la fuente de voltaje equivalente en el extremo receptor hasta la fuente de voltaje equivalente en el extremo de envío. Como puede observarse se incluyen entre ambas fuentes de voltaje ideal la suma de las reactancias equivalentes de los extremos y la impedancia de la línea.

4.8.4 ASPECTOS CONCEPTUALES

Redes Longitudinales: Se les llama redes longitudinales a aquellas en las cuales los centros de carga se encuentran muy alejados eléctricamente de los centros de generación

Distancia Eléctrica: Nos indica que tan cercanas o alejadas eléctricamente se encuentran 2 subestaciones, es función del nivel de voltaje, longitud y número de de Lt's que las conectan; esta dada por una impedancia.

Capacidad de Corto Circuito: Es un indicativo de la robustez de un nodo y nos dice que tan sensible es ese nodo (en voltaje y ángulo) para cambios en la carga conectada a él o en nodos vecinos.

Bus Infinito: Se le llama así a un nodo que no sufre variación en su voltaje o frecuencia para cambios drásticos en su carga.

Impedancia Característica (Z_0): Este valor es un número real definido como:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Donde: L = Inductancia de la LT por unidad de longitud

C = Capacitancia de la LT por unidad de longitud

Potencia Natural: para un perfil de voltaje plano, es la potencia que puede ser transmitida por una LT sin que esta absorba o entregue reactivos al sistema. Esta definida por:

$$P_n = \frac{V^2}{Z_0}$$

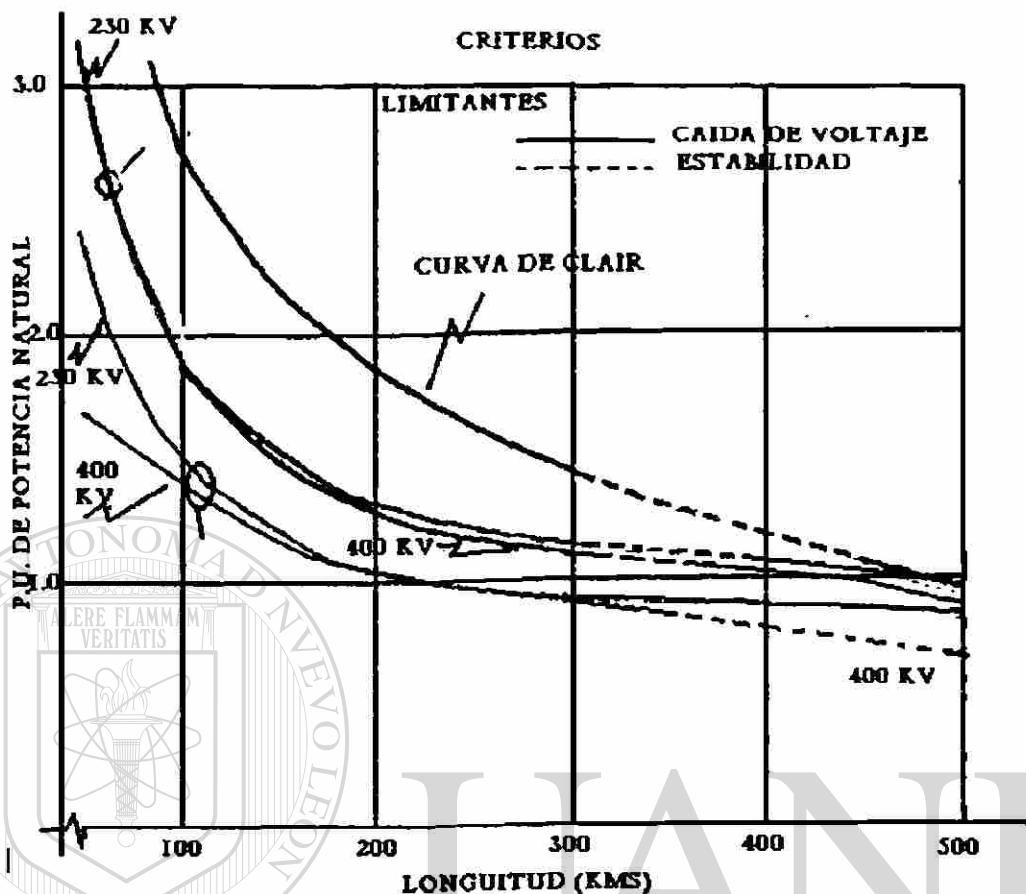


Fig . 4.19 Curvas de Cargabilidad

4.10 CARGABILIDAD DE LT'S EN EL SEN Y SU PROBLEMÁTICA DE OPERACIÓN.

Para determinar cuanta potencia podemos transmitir por una red o una LT el SEN, no sólo debemos tomar en cuenta los criterios tradicionales para cargabilidad analizados anteriormente, es muy importante tener presente la robustez de los nodos extremos de la red o LT que se analiza. Esto debido, como ya se debe tener claro, a la característica longitudinal de la red del SEN.

En la tabla siguiente se muestran los valores de cortocircuito para algunos nodos representativos del SEN y su comparación con capacidades de corto circuito de un sistema robusto.

CAPACIDADES DE CORTO CIRCUITO PARA UNA CORRIENTE DE FALLA DE 50 KA.

<u>VOLTAJE</u>	<u>CCC (MVA) PARA</u>
<u>KV</u>	<u>I_{cc} = 50 KA</u>
115	9959
230	19918
400	34640

CAPACIDADES DE CORTO CIRCUITO DEL TRONCAL DEL SIN

<u>SUBESTACIÓN</u>	<u>CCC(MVA)</u>	<u>SUBESTACION</u>	<u>CCC(MVA)</u>
ANG-400	7 380	ALT-400	4 638
MNT-400	11 855	REC-400	4 097
MPS-400	9 087	TUL-230	9 196
TMD-400	8 174	GLP-230	1 840
PBD-400	8 789	MCZ-230	725
TUL-400	12 079	PBD-115	4 157
PIT-400	6 126	SBM-115	3 390
MNZ-400	5 960	MCZ-115	526
PRD-400	4 179		

En la figura 4.20 se muestran las curvas de cargabilidad para LTS de 400Kv en función de la capacidad de cortocircuito de los nodos extremos, los criterios de margen de estabilidad y caída de voltaje se mantienen constantes; 35% y 5% respectivamente. Recordamos que la capacidad de cortocircuito de los nodos del SEN varia sensiblemente con el número de líneas y generadores en operación.

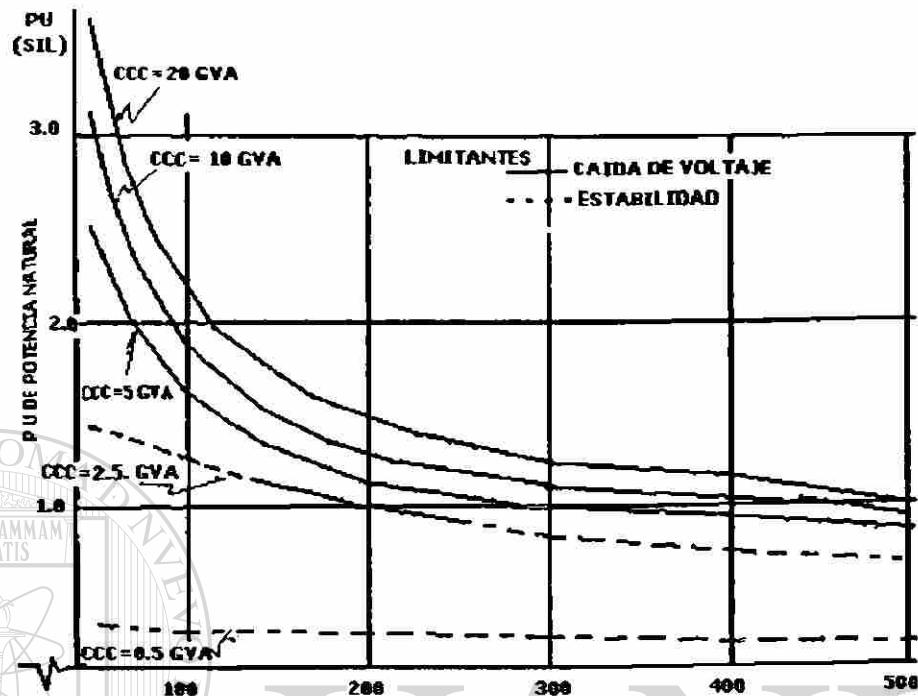


Fig. 4.20 Cargabilidad para LT's de 400 KV en función de la CCC de Envío y Recepción (iguales)

A menudo se tiene LTS transmitiendo potencia a zonas de carga que carecen de fuentes de reactivos. Se puede mejorar notablemente la utilización de las LTS (aumentar su cargabilidad y reducir las pérdidas) si se instalan recursos de compensación con características de respuesta y localización idóneas (compensación shunt en las subáreas).

Por ciertos niveles de demanda, en algunas zonas el disparo de una LT de enlace puede provocar inestabilidad y obligar a reubicar la generación o realizar maniobras para respaldar la zona con problemas.

En el SEN se presenta excedentes de reactivos en Demanda Mínima y déficit en Demanda Máxima, lo que hace necesario la conexión-desconexión discreta de elementos de compensación.

Del análisis de seguridad operativa a menudo se advierte que cierta parte del sistema eléctrico pierde sincronismo ante una contingencia sencilla lo que conduce a la disyuntiva de correr el riesgo de un disturbio extenso o incurrir en elevados costos de operación. Una alternativa adicional es la implementación de algún Control Discreto Suplementario (CDS).

El problema de estabilidad dinámica también es común en el SEN, este se manifiesta como oscilaciones espontáneas de baja frecuencia ante ciertas condiciones de operación. Es importante determinar su origen para establecer medidas correctivas de operación. El remedio más común consiste en modificar la acción del sistema de excitación por medio de estabilizadores de potencia, es necesario realizar estudios a nivel de sistema, con el fin de seleccionar generadores que deben equiparse con estabilizadores, determinar las características de los mismos y definir los ajustes de los estabilizadores de potencia, excitadores y reguladores de velocidad.

Para controlar los sistemas débiles en condiciones de disturbio, es necesario analizar el comportamiento dinámico de la frecuencia e implantar controles de emergencia que permitan restablecer rápida y automáticamente el equilibrio entre Carga-Generación. Uno de estos controles es el Esquema de Desconexión Automática de Carga por baja frecuencia (EDACBF).

4.10.1 COMPORTAMIENTO P-Q DE LAS LT'S

La demanda del SEN varía anual, estacional, semanal, diaria y horariamente. De estas variaciones la mayor es la que se tiene en un mismo día, ver fig. 4.21 esto nos obliga a controlar la potencia reactiva para lograr que el perfil de voltaje permanezca en un rango de operación aceptable.

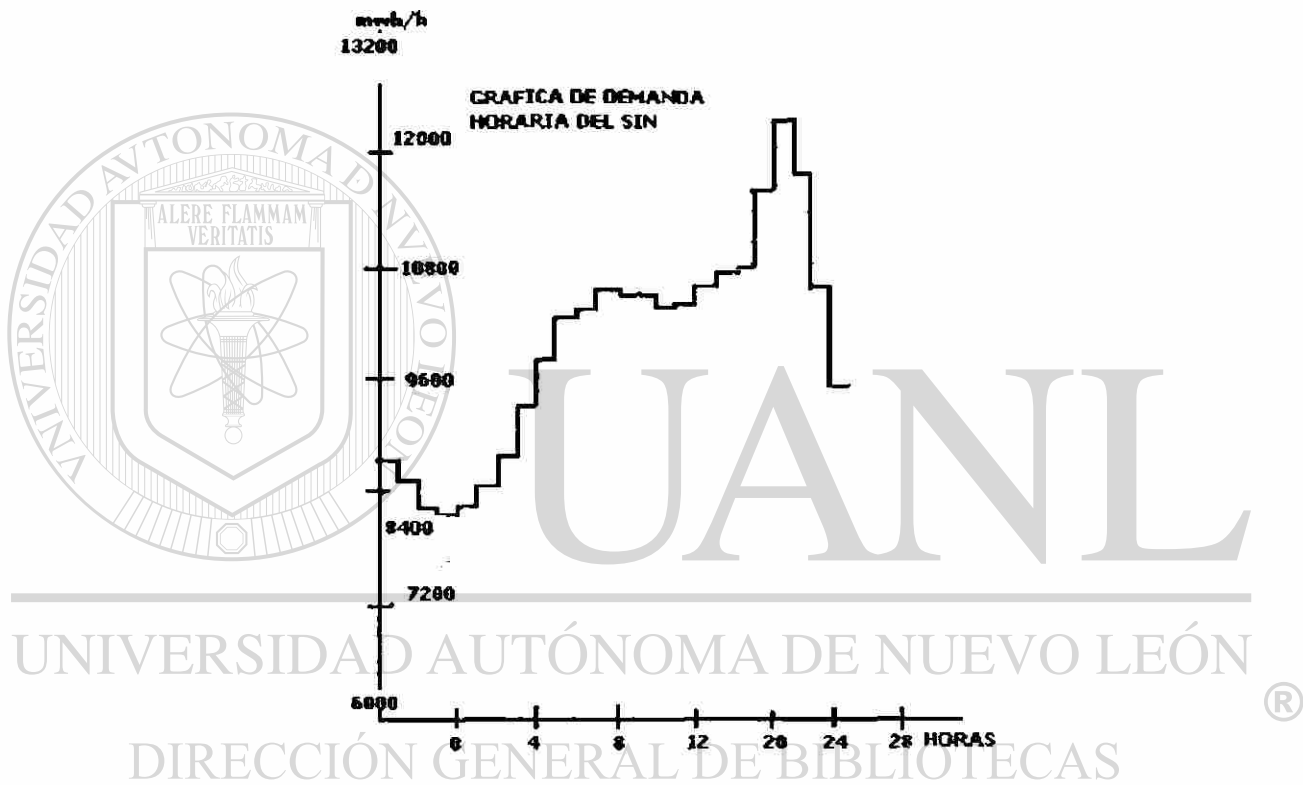


Fig. 4.21. Gráfica de Demanda Horaria del SIN

Durante las horas de Demanda Mínima y Media las líneas generan reactivos que pueden provocar altos voltajes en la red, si no se toman acciones de control tales como conexión de reactores, bajar voltajes de generación en máquinas, mover voltajes de referencia del CEV y como último recurso la apertura de líneas.

En las horas Demanda Máxima es necesario desconectar reactores. Subir voltajes de generación, etc. Ya que al aumentar la transmisión de potencia activa las líneas dejan de

entregar reactivos al sistema e inclusive si la potencia activa transmitida rebasa la potencia natural de la línea, esta consume reactivos del sistema abatiendo los voltajes.

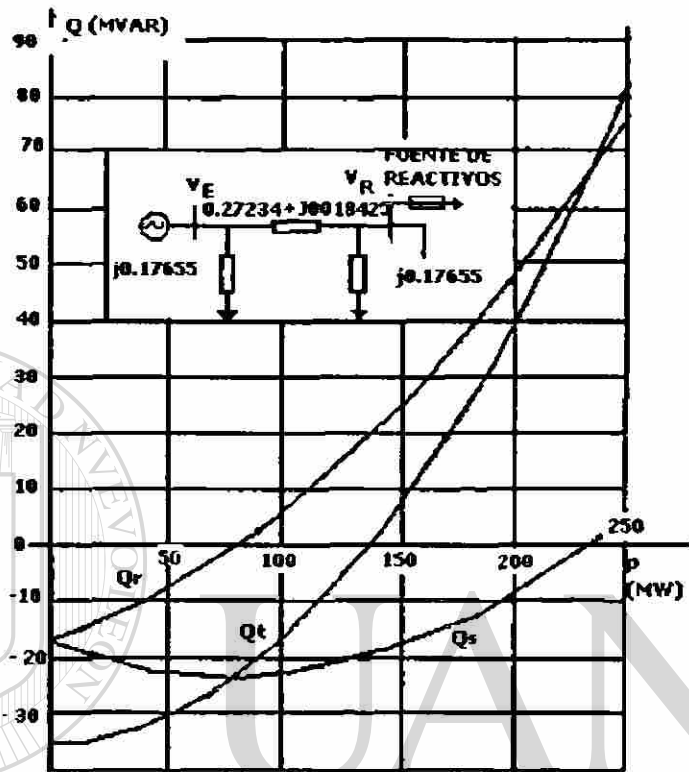


Fig. 4.22 potencia Reactiva de Envío, Recepción y Total para LT de 230 Kv, 200 KMS.

$$V_E = V_R = 1.0 \text{ P.U.}$$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En la fig.4.22 se muestra la magnitud y sentido de la potencia reactiva en el nodo de envío, en el nodo de recepción y total para una LT de 230 Kv, 200kms de longitud ($V_E = V_R = 1.0 \text{ PU}$) en función de la potencia activa transmitida por ella.

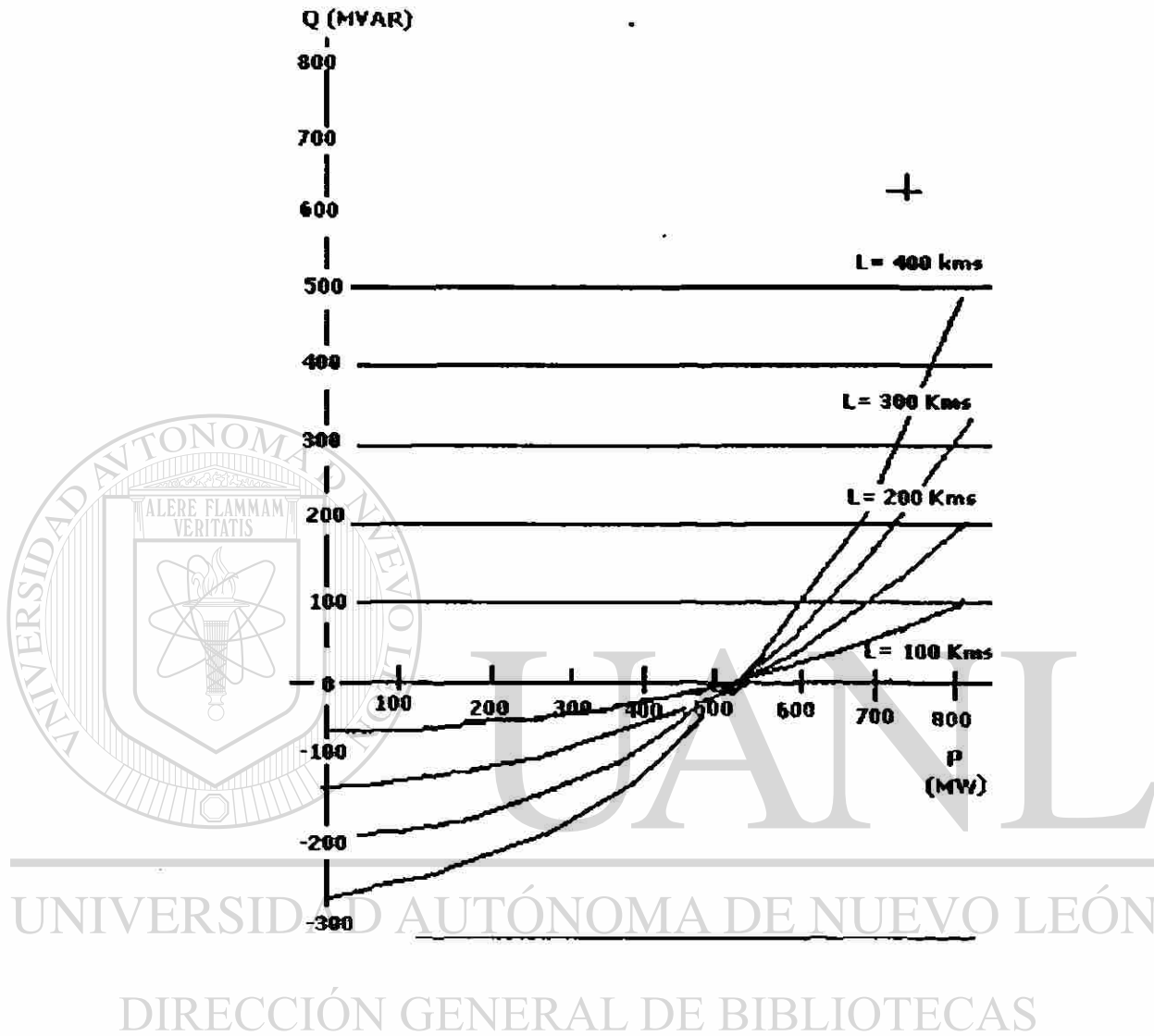
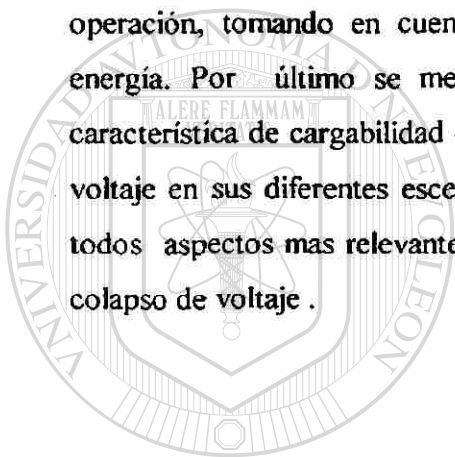


Fig. 4.23. Curvas P-Q para LT'S de 400 KV

En la fig.4.23 se muestra cómo varía la potencia reactiva consumida ó generada por una línea de 400 Kv para diferentes longitudes, en función de la potencia activa transmitida por ella (curvas P-Q para una LT de 400Kv).

4.11 RESUMEN

En este capítulo se ha presentado de manera concreta los conceptos mas relevantes y la problemática de control de voltaje en los Sistemas Eléctricos de Potencia, también se mencionan los escenarios en los que se presenta la estabilidad de voltaje y la inestabilidad de voltaje, y los factores mas relevantes que intervienen en ambas condiciones en un sistema eléctrico de potencia real. También se ha presentado la forma de controlar el voltaje para mantenerlo en un nivel de operación aceptable, y nos explica la manera de manejar la reserva de potencia reactiva, en diferentes condiciones de operación, tomando en cuenta las diferentes estaciones del año y sus demandas de energía. Por último se menciona como parte importante dentro del problema, la característica de cargabilidad de líneas de transmisión y sus efectos en la estabilidad del voltaje en sus diferentes escenarios de operación. En el siguiente capítulo se describen todos aspectos mas relevantes que se han sugerido en la literatura relacionados con el colapso de voltaje .



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO 5

COLAPSO DE VOLTAJE

5.1 INTRODUCCIÓN

Algunas perturbaciones y cambios en la estructura del sistema de potencia pueden iniciar requerimientos de potencia reactiva que no pueden ser suministrados localmente.

Esto causa que el perfil de voltaje se degrade debido a la transferencia de potencia reactiva desde centros de generación remotos. En estas situaciones se tiene una tendencia al colapso de voltaje al tratar de lograr un punto de equilibrio en una condición operativa.

El problema de colapso de voltaje puede ser muy común en sistemas longitudinales donde existen pocas fuentes de reactivos y los centros de consumo están alejados de estas fuentes. Por lado, en sistemas robustos también empieza a aparecer estos problemas al tratar de utilizar a su capacidad máxima las redes de transmisión.

En el análisis del colapso de voltaje el comportamiento de la carga es muy importante ya que puede tener un efecto estabilizador o bien puede hacer mas critico el problema. Los transformadores con cambio automático de tap bajo carga también pueden efectuar la estabilidad del voltaje al modificar la característica propia de la carga.

En el caso general de diseño de estrategias para evitar el problema de colapso requiere considerar un soporte local de voltaje o bien la desconexión programada de carga. En esta sección se presenta los conceptos más importantes sobre el tema, incluyendo el análisis del problema .

5.2 MECANISMOS BÁSICOS DE COLAPSO DE VOLTAJE

Existen una gran cantidad de variables en que se puede presentar el colapso de voltaje, sin embargo la más común se puede ilustra con el sistema de la fig. 5.1

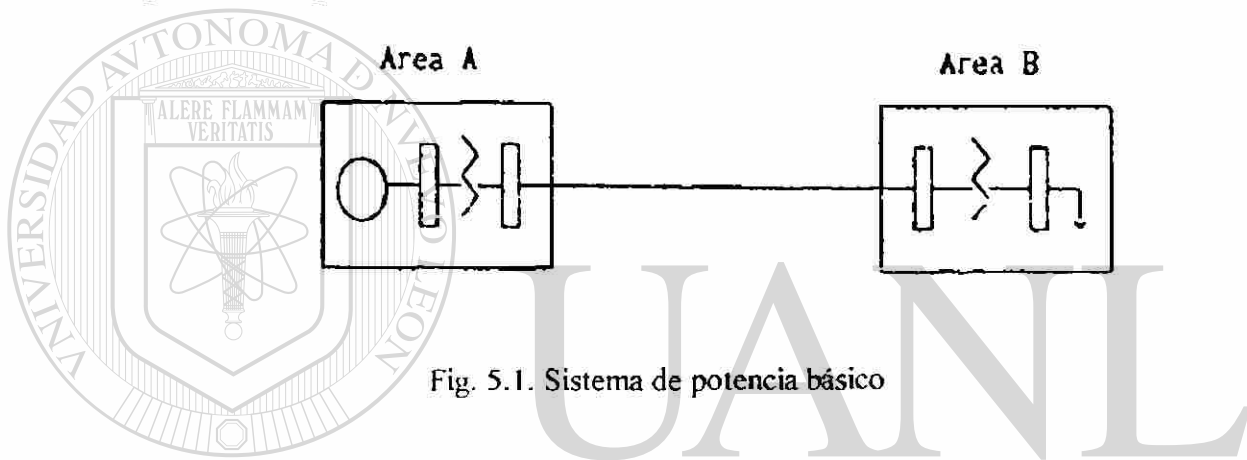


Fig. 5.1. Sistema de potencia básico

En este sistema el Área A es exportadora y es donde se tiene la fuente de potencia reactiva. El Área B es una área de carga, cualquier cambio de carga deberá ser suministrado por el área A a través del sistema de transmisión.

De esta manera se establece una relación entre el voltaje en el nodo de carga y la demanda a suministrar. El control de voltaje dependerá del nivel de carga en el sistema de transmisión y de los requerimientos de reactivos de la carga .

Si se realizan corridas de flujos para diferentes valores de carga activa, con un mismo factor de potencia y un voltaje de generación especificado, se obtiene la característica de la fig. 5.2

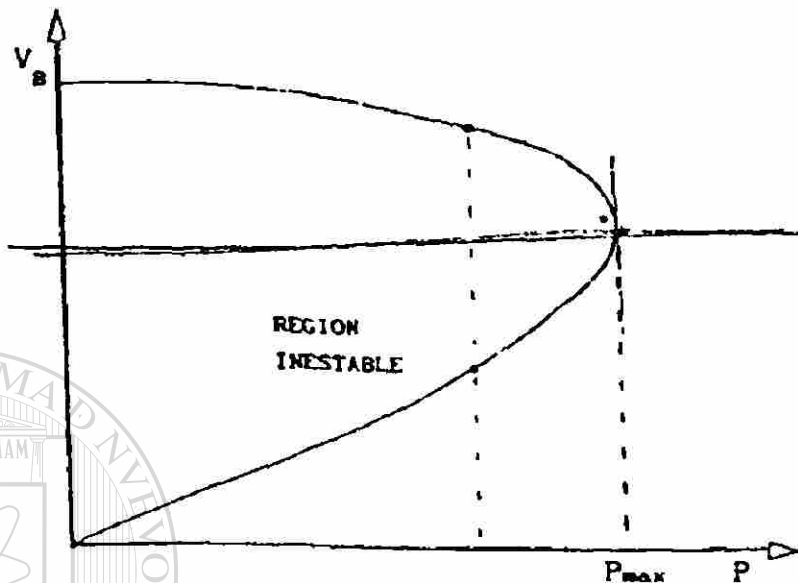


Fig. 5.2. Característica V-P para el sistema básico

En la figura 5.2 se observa que a medida que se incrementa la demanda el voltaje en

el nodo de carga se reduce $\left(\frac{dV_B}{dp} < 0\right)$ y que adicionalmente esta variación es no lineal.


También es importante notar que existe un valor máximo de potencia para el cual es posible controlar el voltaje, en el punto límite. $\frac{dV_B}{dp} = -\alpha$

Las observaciones anteriores permiten detallar el mecanismo de colapso de voltaje para el sistema estudiado. Así al incrementar el nivel de carga se aumenta también el requerimiento de reactivos, ya que se considera un factor de potencia constante, por lo cual el perfil de voltaje se deteriora al viajar la potencia desde el área A. Por otro lado, para un incremento de carga dado, se tiene un cambio mayor en el voltaje a medida que se incrementa el nivel de demanda. En el límite se tiene un cambio muy grande del voltaje (colapso) al tratar de incrementar la demanda.

La interpretación del comportamiento anterior es que no es posible suministrar la potencia especificada en la carga, y en el intento de tratar de lograrlo el voltaje se colapsa. Si se utilizan ecuaciones, el voltaje en la carga del sistema de la fig.5.2 se puede expresar en función de la impedancia del sistema de transmisión (Z_s). No se considera en la ecuación (5.1) el efecto capacitivo en la línea de transmisión .

$$V_B = V_A - Z_S I_B \quad (5.1)$$

Por otro lado, la corriente en la carga (I_B) se determina en función de la demanda especificada (S_B).



$$I_B = \left(\frac{S_B}{V_B} \right)^*$$

(5.2.)

El comportamiento de las ecuaciones (5.2) y (5.1) es no-lineal. así al aumentar la demanda, I_B tiende a aumentar y al mismo tiempo V_B tiende a disminuir (ec. 5.1) con lo cual la corriente I_B tiende a aumentar mas (ec. 5.2). Esto causa un ciclo divergente donde el voltaje continúa disminuyendo.

Si se substituye (5.2) en (5.1) se obtiene una función cuadrática para el voltaje.

$$* \quad * \quad *$$

$$V_B V_B - V_A V_B + Z_S S_B = 0 \quad (5.3)$$

Resolviendo para el voltaje V_B , en sus componentes real (e_B) e imaginaria (f_B), se obtiene;

$$f_B = \frac{xP - rQ}{e_A} \quad (5.4)$$

$$e_B = \frac{e_A + e_A^2 - 4(rp + xQ + f_b^2)}{2} \quad (5.5)$$

para obtener f_b y f_B en (5.4) y (5.5) se considera conocido e_A y las componentes de ZS ($r + jx$).

En (5.5) se observa que hay una doble solución para un valor especificado de carga (P,Q), una será con un voltaje alto y otra con un voltaje bajo. Esto también se observa en la fig. 5.2 donde para valores de P menores a P_{max} existen dos puntos de voltaje que cumplan con los requisitos establecidos. Sin embargo, la región inferior de la curva es inestable ya que el comportamiento es opuesto al esperado. En esta parte cual no se considera una región factible de operación. Además es una solución de bajos voltajes y altas corrientes donde se tendrán pérdidas excesivas.

5.3 ESCENARIO TÍPICO DE UN COLAPSO DE VOLTAJE.

Cuando un sistema de poder es sometido a un incremento de demanda de potencia reactiva, seguido de una contingencia del sistema la demanda adicional es reunida por las reservas de potencia reactiva llevadas por los generadores y compensadores. Generalmente hay reservas suficientes y el sistema establece un nivel de voltaje estable. Sin embargo, es posible, debido a una combinación de eventos y condiciones del sistema, que la demanda de potencia reactiva adicional puede llevar al colapso de voltaje, causando una avería mayor en parte o en todo el sistema..

Un escenario típico de un colapso de voltaje puede ser el que sigue

El sistema de Potencia está experimentando condiciones de operación anormales con unidades generadoras grandes cerca de los centros de carga que están fuera de servicio. Como resultado, algunas líneas EHV están fuertemente cargadas y los recursos de potencia reactiva están en un mínimo.

145449

- El efecto disparador es la pérdida de una línea fuertemente cargada que podría causar carga adicional en las restantes líneas adyacentes. Esto podría incrementar las pérdidas de potencia reactiva en las líneas causando una fuerte demanda de reactivos en el sistema.
- Seguido inmediatamente a la pérdida de la línea EHV, habrá una reducción considerable de voltaje en los centros de carga adyacentes debido a la demanda extra de reactivos. Esto podría causar una reducción de carga y teniendo consecuentemente un flujo de poder a través de líneas EHV que tienen un efecto estabilizador. Los generadores AVR's pueden de todas maneras, reestablecer rápidamente voltajes de terminales aumentando la excitación. El flujo de poder reactivo adicional resultante a través de las inductancias asociadas con transformadores del generador y líneas causaría caídas de voltaje aumentada por cada uno de estos elementos. En esta fase, los generadores estarían operando con los límites altos de temperatura en los devanados de campos y de armadura. el gobernador de velocidad regularía frecuencia reduciendo rendimiento de MW.
- La Reducción del nivel de voltaje EHV en centros de carga pueden reflejarse en la distribución del sistema.
- Como resultado con cada operación tap-change el rendimiento reactivo del generador se incrementará. Gradualmente los generadores golpearán sus límites de capacidad de poder reactivo, uno por uno. Cuando el primer generador alcanza su límite de campo de corriente su voltaje podría caer. Al voltaje terminal reducido para un rendimiento del MW fijo, la corriente de la armadura aumentaría. Esto puede limitar el rendimiento reactivo más allá para guardar la armadura actual dentro de los límites aceptables. Su porción de carga reactiva se transferiría a otros generadores en mando de excitación automática, el sistema sería mucho más propenso a la inestabilidad de voltaje.

El proceso eventualmente permitirá el colapso de voltaje, probablemente permita la pérdida de sincronismo de unidades generadores y una corte de carga mayor

5.4 CARACTERÍSTICAS GENERALES BASADAS EN INCIDENTES ACTUALES

Ha habido un número de colapsos de voltaje a lo largo del mundo, basados en estos incidentes, el derrumbamiento de voltaje se caracteriza de la siguiente manera:

1.- El evento inicial puede deberse a una variedad de causas: pequeños cambios graduales del sistema, como un incremento natural en la carga del sistema o desórdenes largos repentinos como pérdidas en la unidad generador o líneas fuertemente cargadas. Algunas veces una alteración aparentemente tranquila puede permitir eventos subsecuentes que pueden causar en el futuro un derrumbamiento del sistema.

2.- El corazón del problema es la inhabilidad del sistema para enfrentar sus demandas reactivas. Usualmente, pero no siempre, el colapso de voltaje involucra condiciones del sistema con líneas fuertemente cargadas. Cuando el transporte de poder reactivo de áreas vecinas es difícil, cualquier cambio que requiere apoyo de potencia reactiva adicional puede llevar al colapso de voltaje

3.- El colapso de voltaje generalmente se manifiesta como un lento descenso de voltaje. Es el resultado de un proceso acumulativo que involucra acciones e interacciones de muchos dispositivos, controles y sistemas de protección. El horario de derrumbamiento en tales casos podría estar en el orden de varios minutos. La duración del derrumbamiento dinámico del voltaje en algunas situaciones pueden ser muy cortas. Dichos eventos suelen ser causados por componentes desfavorables de carga como motores de inducción y convertidores. El horario de derrumbamiento en esta clase de inestabilidad de voltaje es la misma que la inestabilidad de un rotor de ángulo.

En muchas situaciones, la distinción entre voltaje e inestabilidad de ángulo puede no ser muy clara, y en algunos aspectos ambos fenómenos pueden existir. Esta forma de inestabilidad de voltaje puede ser analizada por simulaciones de estabilidad convencionales, con tal de que se usen modelos apropiados para representar los dispositivos, particularmente las cargas del motor de inducción, y varios controles y protecciones son asociadas con los generadores y equipo de la transmisión.

4.- El colapso de voltaje es fuertemente influenciado por condiciones y características de sistemas. Los siguientes son factores que contribuyen significativamente a la inestabilidad y derrumbamiento de voltaje.

- Largas distancias entre la generación y la carga
- Acciones de ULTC's durante condiciones de bajo voltaje.
- Características desfavorables de carga
- Falta de coordinación entre diferentes sistemas de control y protección.

5.- El problema de colapso de voltaje puede agravarse por el uso excesivo de condensadores en desviación. La compensación reactiva puede hacerse más efectiva que perjudicial escogiendo una combinación de capacitores de derivación, CEV'S y condensadores posiblemente síncronos.

5.4.1 CLASIFICACIÓN DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE.

Es de gran ayuda clasificar la estabilidad de voltaje en dos categorías: alteraciones-largas de estabilidad de voltaje y alteraciones-pequeñas de estabilidad de voltaje. Esta clasificación pueden simplificar el desarrollo analítico y su aplicación, y puede producir herramientas que produzcan información complementaria.

La estabilidad de voltaje en Large-disturbances (alteraciones-largas) se preocupa por una habilidad del sistema de controlar voltajes que siguen perturbaciones grandes como fallas del sistema, pérdidas de carga, o pérdidas de generación. La determinación de estas formas de estabilidad requiere examinar la actuación dinámica del sistema por un periodo de tiempo suficiente para capturar las interacciones de tales dispositivos como ULTCs y limitadores de campo de corriente del generador. Las alteraciones-largas (large-disturbances) pueden ser estudiada usando simulaciones no lineales de tiempo-dominio que incluyen un apropiado modelado.,

Las alteraciones largas de estabilidad de voltaje, puede ser subdividida en transitorios y horarios a largo plazo.

Las alteraciones pequeñas de control de estabilidad se preocupa por una habilidad de los sistemas de controlar voltajes que siguen perturbaciones pequeñas, como cambios

graduales en carga. esta forma de estabilidad puede estudiarse eficazmente con acercamientos del steady-state que usan linearización de las ecuaciones dinámicas del sistema en un punto dado de operación.

Seguida a la alteración los voltajes del sistema no vuelven a su nivel original. Por eso es necesario definir una región de voltaje considerada aceptable. Se dice entonces que el sistema tiene una estabilidad finita dentro de la región especificada de nivel de voltaje.

5.5 ASPECTOS DEL ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DEL VOLTAJE

El análisis de la estabilidad de voltaje en un sistema eléctrico de potencia, dada una condición de operación, comprende el estudio de aspectos como el valorar la proximidad a la inestabilidad de voltaje y los mecanismos que explican su aparición.

5.5.1 PROXIMIDAD A LA INESTABILIDAD DE VOLTAJE

Por seguridad operativa es deseable conocer qué tan cerca se encuentra el sistema de potencia respecto a una condición de inestabilidad de voltaje. Esto implica determinar un índice o la distancia que separa la condición actual de operación al punto de máxima transferencia de potencia por estabilidad de voltaje.

El índice puede ser medido en términos de cantidades físicas, tales como: el nivel de carga, valores de flujo de potencia activa a través de enlaces críticos, y en función de las reservas de potencia reactiva existentes en el sistema. Así, por ejemplo en el control y la operación del sistema es posible conocer la proximidad a condiciones de inestabilidad de voltaje en función de la máxima transmisión de potencia por estabilidad de voltaje, asociada ésta a los centros de consumo más débiles (con menor soporte de voltaje) del SEP, como lo muestra la fig 5.3

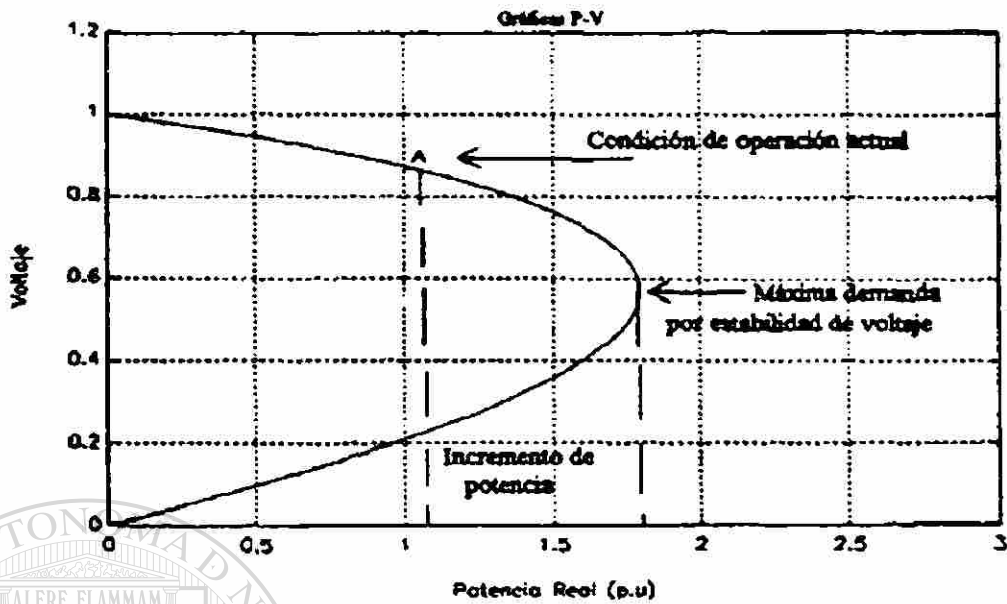


Fig. 5.3. Cálculo de la proximidad a la inestabilidad de voltaje mediante curvas P-V

También se puede conocer la proximidad a la condición de inestabilidad de voltaje en función de la magnitud de las reservas reactivas para un nivel de carga dado, y ante la ocurrencia de ciertas contingencias en el sistema.

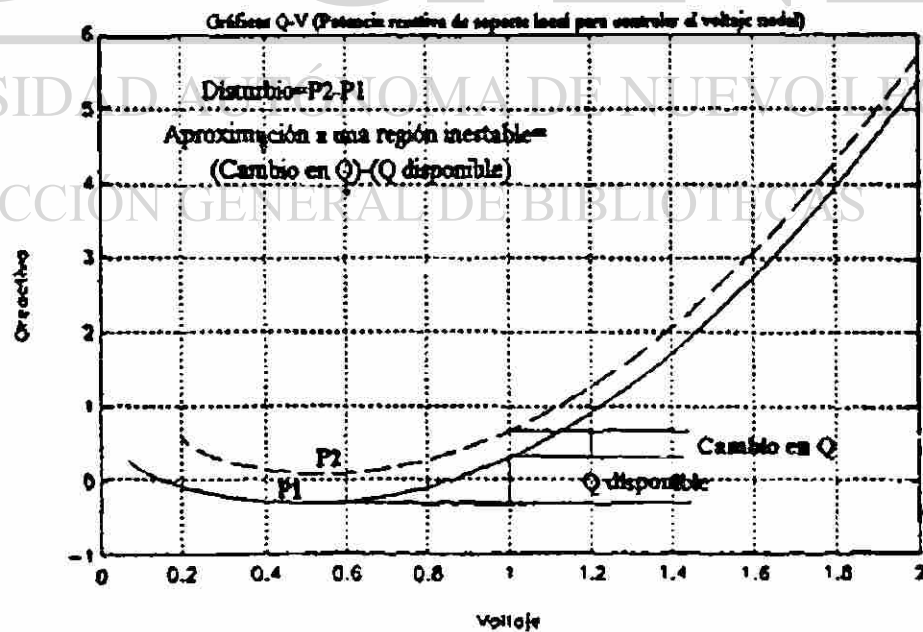


Fig.5.4. Cálculo de la proximidad a la inestabilidad de voltaje mediante curvas Q-V

Como lo muestra la fig.5.4, la proximidad a la inestabilidad de voltaje ante la presencia de una contingencia, en función de las reservas reactivas, se puede calcular como la diferencia aritmética entre las reservas de potencia reactiva disponibles de acuerdo a la condición de operación dada, y el cambio en la potencia reactiva como resultado de la presencia de una contingencia.

5.5.2 MECANISMOS DE INESTABILIDAD DE VOLTAJE

En esta parte del análisis es de interés determinar cómo y porqué se presenta una posible condición de inestabilidad de voltaje; es decir, precisar los factores claves que pueden contribuir a una condición de inestabilidad de voltaje ante una condición de operación dada. También es importante la ubicación de áreas débiles en reactivos/voltaje a lo largo del sistema, así como la identificación de las medidas más efectivas a llevar a cabo para lograr el mejoramiento de la estabilidad del voltaje.

Los diferentes mecanismos de inestabilidad de voltaje son detectados estudiando la cronología de un disturbio en el sistema, mediante simulaciones en el dominio del tiempo, lo cual se conoce como análisis dinámico de la estabilidad de voltaje. En su aplicación se persigue el estudio detallado de condiciones específicas de inestabilidad de voltaje, la coordinación adecuada de dispositivos de control y de las protecciones del sistema, así como la identificación de medidas correctivas que impliquen alcanzar un nuevo punto de equilibrio o de estado estable.

Las características dinámicas del sistema que tiene influencia sobre la estabilidad de voltaje por la presencia de pequeñas perturbaciones lentas. Por lo tanto, el problema puede ser eficientemente analizado mediante el uso de métodos de análisis estático, ya que por medio de estas técnicas se analizan las condiciones que rigen la operación en equilibrio del sistema se lleva a ubicar las áreas débiles, y se identifican por sensibilidad los diferentes factores que influyen en una condición de inestabilidad.

5.6 APLICACIÓN DE CEV'S PARA EVITAR COLAPSOS DE VOLTAJE.

Los compensadores estáticos de var's generalmente estan compuestos por capacitores y/o reactores, incluyendo un regulador de voltaje y lógica de control para el 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 variado el ángulo de disparo de los tiristores, logrando de esta forma el control continuo de la corriente en el reactor.

La aplicación de CEV's en redes eléctricas presenta ventajas en los aspectos siguientes:

- Aumenta la cargabilidad de sistemas de transmisión
 - Mejoran el límite de estabilidad transitoria
 - Mejoran la estabilidad dinámica amortiguando oscilaciones
 - Controlan los sobrevoltajes temporales y de estado estable
 - Amortiguan oscilaciones subsíncronas
-
- Permiten la compensación por fases en cargas monofásicas variables
 - Mejoran el funcionamiento de terminales convertidoras de CD
 - Proporcionan la compensación inductiva necesaria para el recierre monopolar

En la planificación para incorporar CEV'S a un sistema eléctrico de potencia se deben considerar y analizar los siguientes puntos:

- Aplicación principal del CEV.
- Dimencionamiento.
- Tipo
- Localización

Las respuestas a los aspectos anteriores no son obvias o generales. Es necesario enfocarnos al sistema de potencia particular mediante estudios completos considerando distintas condiciones de operación. Los análisis deben incluir:

- Estudios de fallas
- Estudios de flujos de potencia
- Estudios de estabilidad transitoria y dinámica
- Estudios de transitorios y armónicas

Si bien los CEV'S mejoran varios aspectos en la operación es muy importante definir la función primordial para la que se está especificando. De las aplicaciones mencionadas hay tres que son las más relevantes:

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

5.7 COMPORTAMIENTO DE LA CARGA.

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

Si se considera el sistema de la Figura fig. 5.1 (5.2 etc.) donde ahora se modifica el factor de potencia de la carga, es posible obtener una familia de características V-P para diferentes valores del factor de potencia. Fig. 5.5

En la Fig. 5.5 se observa que existen diferentes límites de potencia al variar la potencia reactiva de carga. Esto refleja el efecto positivo de compensar la potencia reactiva de la carga en la determinación del límite de transmisión por voltaje. Sin embargo, la interpretación de mayor interés está relacionada con el problema de colapso

de voltaje. Así, si la carga en el Area B por alguna razón cambia de factor de potencia esto podría causar un colapso.

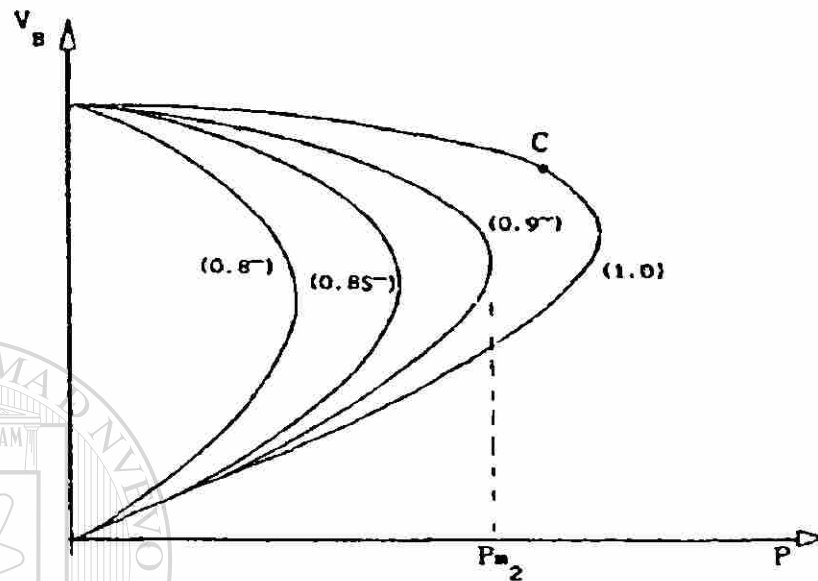


Fig. 5.5. Característica V-P para diferentes factores de potencia

Si el punto de operación en la curva con factor de potencia unitario es C, entonces al pasar a un factor de potencia de 0.9 atrasado no existe intersección entre el valor correspondiente de potencia activa y esta curva, ya que es mayor que el valor máximo (P_{m2}). El resultado es un colapso de voltaje.

El cambio de característica puede ser resultado de la pérdida (contingencia) de equipo de compensación para corregir el factor de potencia. Es una condición operativa que debe vigilarse para evitar el colapso.

5.7.1. TIPOS DE CARGA

En todos los desarrollos y características presentadas anteriormente se ha considerado una demanda de potencia activa y reactiva constante, es decir independiente de la

magnitud del voltaje en el punto de carga. Lo cual define un comportamiento y una característica de la carga en su interacción con el sistema.

Si la carga es sensible a las variaciones de voltaje, la solución del problema puede ser muy diferente. El modelo general considera un consumo de potencia activa (P_0) y potencia reactiva (Q_0) al voltaje nominal (V_0)

En la ecuación (5.3) los exponentes α Y β dependen del tipo de carga.

La comparación de las características se presenta en la Fig. 5.6. donde se muestra la diferencia entre una carga que se representa como impedancia constante y otra con un consumo de potencia constante.

La conclusión es que el problema de colapso puede que no se presente al tener una demanda variable que es función del voltaje.

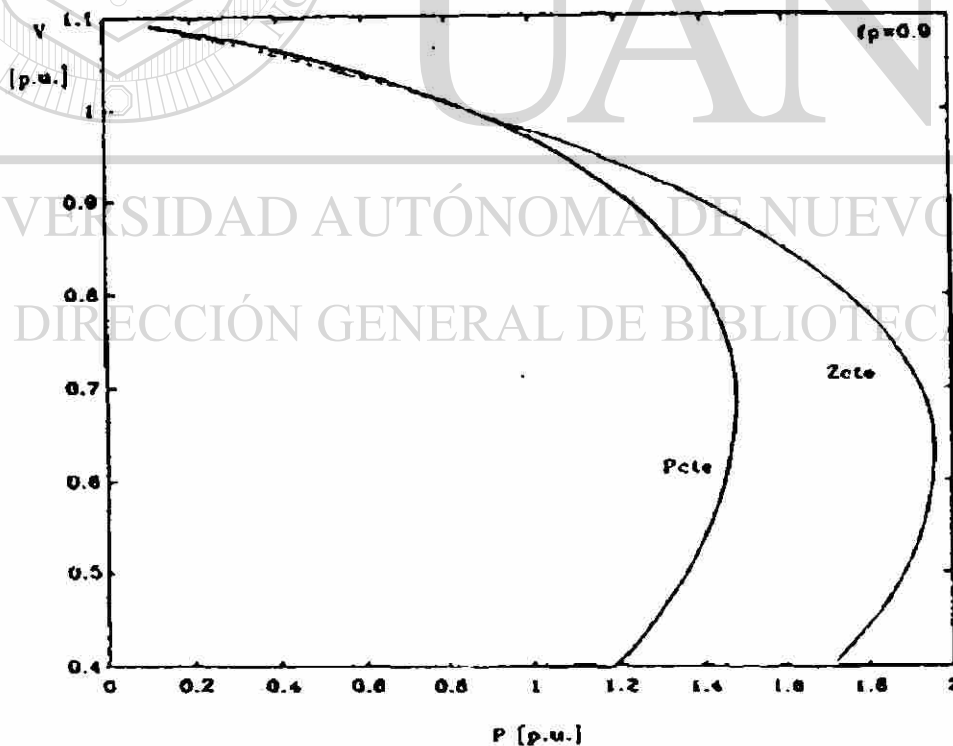


Fig. 5.6. Comparación de características V-P para diferentes tipos de carga.

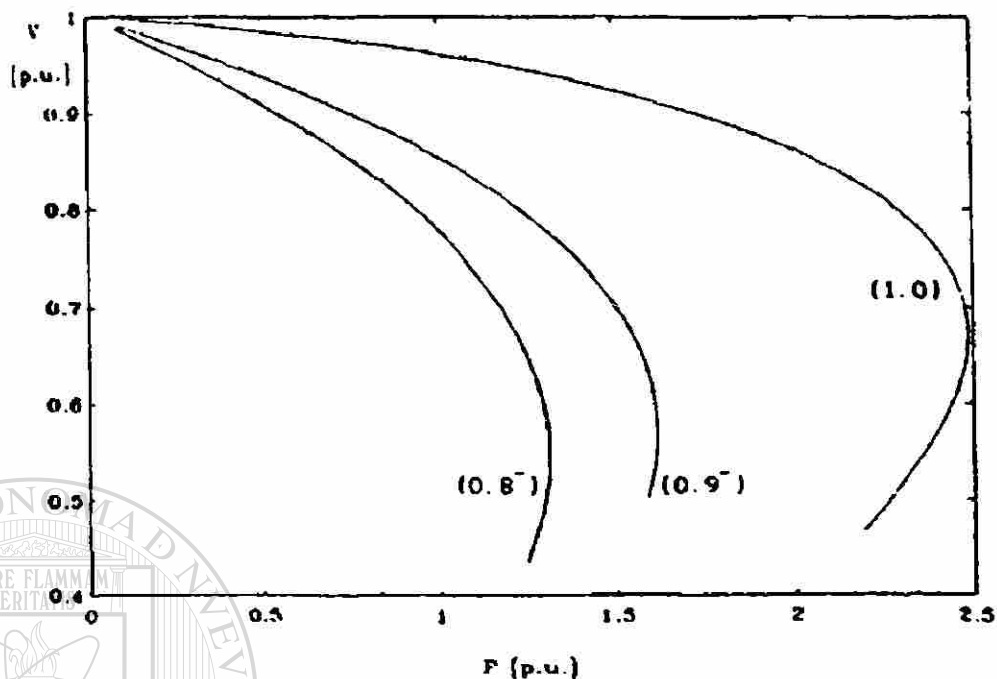


Fig. 5.7 Características V-P para diferentes factores de potencia. Carga modelada como impedancia constante.

El efecto de cambiar el factor de potencia para la carga representada como impedancia se muestra en la Fig. 5.7. Se observa una tendencia similar al de la representación como potencia constante, a medida que el factor de potencia es más atrasado se reduce el límite máximo de transmisión. En este caso la potencia activa en el eje horizontal es la que consume la carga al valor del voltaje indicado.

5.7.2. CARACTERÍSTICA Q-V

Otra manera de analizar el comportamiento del sistema es a través de las características Q-V para valores especificados de flujos de potencia activa. Esta representación puede ser más útil ya que permite incluir la compensación de potencia reactiva en la carga, con lo cual hace posible el diseño de estrategias para evitar el colapso de voltaje.

En la Fig 5.8. se presentan características típicas. En estas curvas se integran casos con factor de potencia variable, se muestra el comportamiento de voltaje para diferentes valores de inyección reactiva.

Aquí lo más relevante es que se asocia el problema de voltaje con el consumo o inyección de reactivos de la carga. Se observa que a medida que el nivel de carga activa es más alto se requiere una inyección capacitiva para mantener un nivel de voltaje aceptable.

Esta figura el punto de intersección entre una característica y el eje de voltaje representa un punto de operación con factor de potencia unitario. Se observa que ese punto no existe para algunas características, esto indica que para ese nivel de carga no se puede controlar el voltaje si no hay una inyección de reactivos.

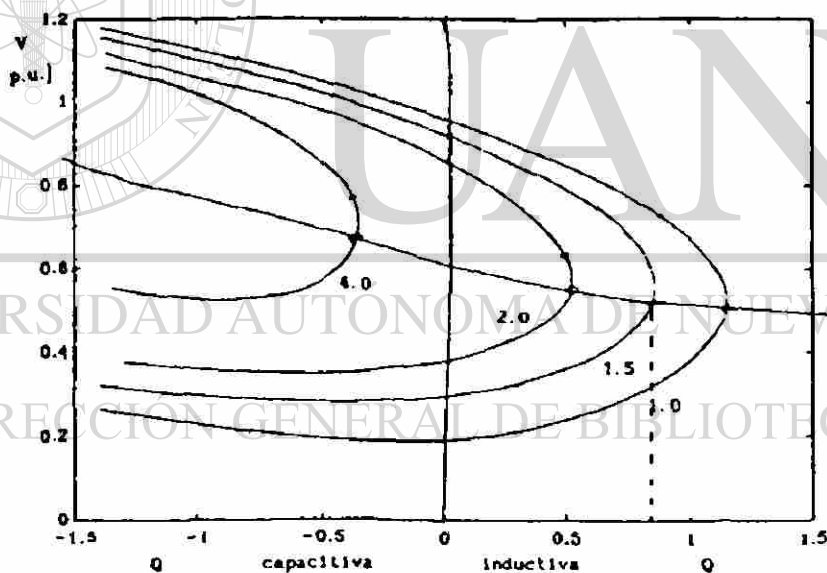


Fig. 5.8. Característica Q-V para diferentes niveles de carga activa.

En la Fig. 5.8. la curva A muestra una reducción de voltaje a medida que las condiciones de operación pasan de un valor de factor de potencia adelantado a valores menores. En la curva B el control de voltaje se tiene para un rango amplio de factores de potencia, incluyendo adelantado, unitario y atrasado.

La inyección reactiva en el eje horizontal de la Fig. 5.8 es una combinación del consumo de reactivos de la carga y la compensación disponible en ese nodo. De esta forma, el colapso de voltaje se puede presentar para diferentes niveles de demanda de potencia activa dependiendo del consumo de potencia reactiva.

Matemáticamente el cambio de voltaje al tener una variación de carga reactiva tiende a tener valores muy altos al acercarse al punto de colapso.

$$\frac{dV}{dQ} = -\infty$$

5.8 PREVENCIÓN DEL COLAPSO DE VOLTAJE.

Esta sección identifica el proyecto del sistema y las medidas de operación que pueden ser tomadas para prevenir colapsos de voltaje.

5.8.1 APLICACIÓN DE DISPOSITIVOS DE COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

Los márgenes de estabilidad adecuados deben ser asegurados mediante la selección apropiada de esquemas de compensación. La selección de los tamaños, valores y dispositivos de la compensación deben de basarse en un estudio detallado que cubra condiciones mas importantes del sistema para que este opere satisfactoriamente.

El criterio basado en un máximo voltaje aceptable siguiente a una contingencia no es a menudo satisfactorio desde el punto de vista de estabilidad de voltaje. el margen de estabilidad debe ser basado en las distancias a inestabilidad de los MW y MVAR'S Es importante para reconocer áreas de control de voltaje y los límites de la transmisión débiles en esta estimación.

5.8.2 CONTROL DE VOLTAJE EN LA RED Y GENERADOR DE POTENCIA REACTIVA.

La carga de compensación de un generador AVR regula voltaje en el lado de alta tensión, o a medio camino a través de el transformador elevador. En muchas situaciones esto tiene un efecto benéfico en estabilidad de voltaje moviendo el punto de voltaje constante eléctricamente más cerca a las cargas.

Alternativamente, el mando de excitación exterior secundario del generador puede usarse para regular el voltaje lateral de la red. Esto debe ser mucho más lento que la regulación normal de generador el voltaje terminal para minimizar interacción adversa de los dos mandos. Un tiempo de la respuesta de aproximadamente 10 segundos es normalmente adecuado para el control de un circuito exterior.

Varias empresas están desarrollando esquemas especiales para el control de voltajes de la red y potencia reactiva.

5.8.3 COORDINACIÓN DE CONTROL Y PROTECCIÓN.

Uno de las causas de colapso de voltaje es la falta de coordinación entre los controles y protecciones del equipo y los requisitos de sistema de potencia. Debe asegurarse una coordinación adecuada basada en estudios de simulación dinámicos.

Donde quiera que sea posible, deben mantenerse medidas del mando adecuadas (automáticas o manuales) relevando la condición de la carga excesiva antes de aislar a el equipo del sistema.

5.8.4 CONTROL DE TRANSFORMADORES CON CAMBIADOR DE TAP BAJO CARGA (ULTC)

Los Transformadores con cambiador de tap bajo carga pueden controlarse local o centralmente, para reducir el riesgo de colapso de voltaje. Muchas empresas están utilizando este esquema.

Hay potencial para la aplicación de ULTC mejorando estrategias de control. Deben desarrollarse tales estrategias basados en un conocimiento de la carga y características de sistema de distribución.

Un microprocesador ULTC controla y ofrece flexibilidad casi ilimitada por llevar a cabo estrategias de control de ULTC's para tomar ventaja de las características de carga.

Por otro lado, donde mantener los voltaje secundarios es beneficioso, los controles ULTC deben ser aplicados. Existe incluso una posibilidad de aumentar los voltajes ligeramente arriba de lo normal. La mejor estrategia depende de las características del sistema específico.

5.8.5 MARGEN DE ESTABILIDAD.

El sistema debe operarse con un margen adecuado de estabilidad de voltaje mediante la planificación apropiada de recursos de poder reactivo y perfil de voltaje. No hay ninguna pauta ampliamente aceptada en la actualidad para la selección del grado de dicho margen ni de los parámetros a ser usados por el sistema como índices.

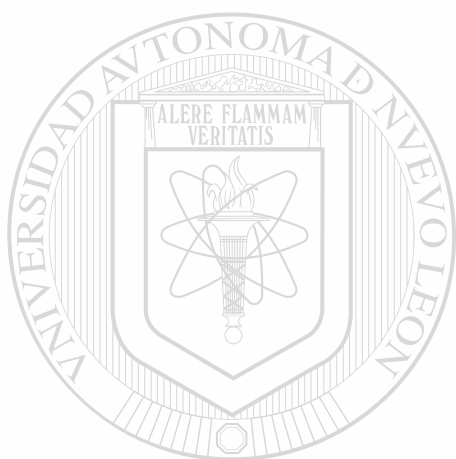
Si el margen requerido no puede ser reunido usando recursos de poder reactivo disponibles y medios de mando de voltaje, puede ser necesario limitar las transmisiones de poder para poner en marcha unidades generadoras adicionales para proporcionar apoyo de voltaje a las áreas críticas

5.8.6 RESERVA OSCILANTE.

Una adecuada reserva de poder oscilante debe ser asegurada por generadores operantes si es necesario, en excitación, moderación y baja excitación y cambios en los condensadores de desviación para mantener el voltaje. La reserva requerida de ser identificada y mantenida en cada área de control de voltaje.

5.8.7 ACCIONES DE LOS OPERADORES.

Los operadores deben de estar preparados para reconocer síntomas relacionados con estabilidad, tomar las soluciones apropiadas tales como control de transferencia de potencia y voltaje y como último recurso el tiro de carga. Las estrategias de operación que previenen el colapso de voltaje deber ser establecidas. El monitoreo y análisis para identificar problemas potenciales de estabilidad de voltaje pueden ser invaluable en lo referente al tema



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

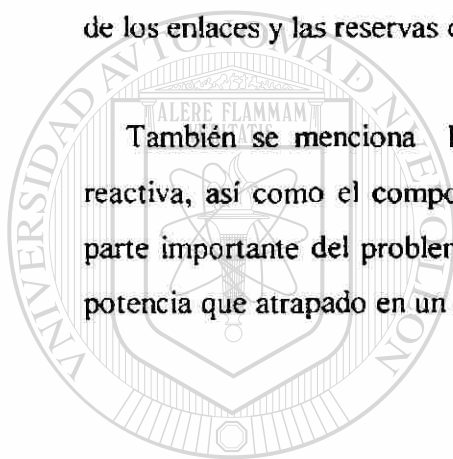


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

5.9 RESUMEN.

En este capítulo se ha presentado de una manera breve y concreta el problema de colapso de voltaje, identificando claramente el escenario de un colapso de voltaje, y las causas que nos llevarían a tener una inestabilidad de voltaje, así como la secuencia de eventos que originan un deterioro en el perfil de voltaje llevando a un Sistema Eléctrico de Potencia a un colapso de voltaje, también se identifica claramente una condición ó proximidad de un Sistema Eléctrico de Potencia a la inestabilidad de potencia en donde se identifican los términos de valor de carga, valores de flujos de potencia activa a través de los enlaces y las reservas de potencia reactiva.

También se menciona la aplicación de dispositivos de compensación de potencia reactiva, así como el comportamiento de la carga y tipos de carga, se presenta como parte importante del problema un esquema de prevención para evitar que un sistema de potencia que atrapado en un colapso de voltaje.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO 6

TÉCNICAS DE SOLUCIÓN

6.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se analiza la herramienta utilizada en la actualidad para el estudio de Sistemas Eléctricos de Potencia. El Simulador Interactivo de Sistemas de Potencia (SISP). Se presentan las características relevantes y las guías para la utilización del SISP. Desarrollado por el personal del Departamento de Investigación y Desarrollo del Centro Nacional de Control de Energía de la Comisión Federal de Electricidad de México.

El SISP, es de gran utilidad desde el punto de vista de operación y planeación del sistema eléctrico, es importante identificar los problemas y limitaciones más importantes para operar en forma económica y segura. En estudios de planeación las alternativas para analizar son grandes, debido al crecimiento de la demanda año con año, y a que las condiciones operativas son distintas en el periodo del año que se analiza. En la evaluación de la seguridad operativa existen diferentes tipos de estudio debido a las diferentes perturbaciones posibles y por la ubicación de las mismas.

El objetivo global del simulador SISP, es proporcionar un apoyo sólido para evaluar la seguridad operativa del sistema eléctrico y crear estrategias que se apliquen en el sistema eléctrico a lo largo de las diferentes temporadas del año; así como diseñar

estrategias para operar con un alto nivel de seguridad en forma continua, minimizando la operación en estado de emergencia.

6.2. ESTRUCTURA DEL SIMULADOR.

El simulador SISP incluye los siguientes modelos:

- Estudio de flujos de potencia (FLUJOS)
- Estudio de Fallas (FALLAS)
- Estudio de estabilidad en el dominio del tiempo (ESTABI)
- Estudio de estabilidad en el dominio de la frecuencia (DINAMI)
- Determinación de parámetros de líneas de transmisión (PARLIN)

Cada modelo permite realizar una función de análisis y está diseñada en forma independiente mediante módulos o actividades que permitan secuencias de ejecución flexibles y eficientes.

La comunicación entre módulos computacionales se efectúa a través de archivos o de información en memoria para facilitar la interacción o el almacenamiento de resultados.

En la figura 6.1 se presenta un diagrama esquemático de las funciones de análisis integradas en el simulador SISP.

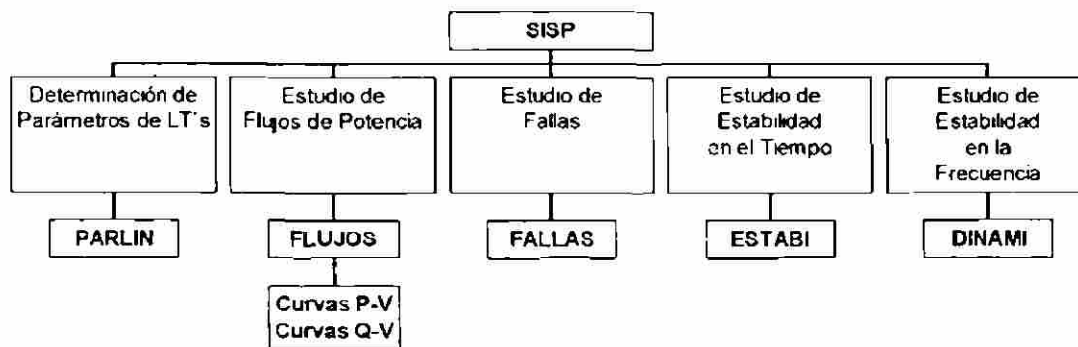


Figura 6.1. Estructura General del Simulador Interactivo de Sistemas de Potencia.

6.3. DESCRIPCIÓN DE FUNCIONES

6.3.1. ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA.

Este modelo permite efectuar el análisis en estado estable de un sistema eléctrico de potencia. Las facilidades disponible en el modelo permiten realizar las actividades siguientes:

- Identificación de islas eléctricas.
 - Solución automática para cada isla.
 - Selección automática de nodos compensadores.
 - Identificación de áreas y subáreas en el sistema.
 - Manejo de límites de potencia reactiva en generadores.
 - Inclusión de restricciones de intercambio de potencia activa entre áreas del sistema.
 - Control remoto de voltaje en nodos de carga mediante taps de transformadores.
-
- Control remoto de voltaje en nodos de carga mediante voltajes de generación.
 - Modelado de transformadores defasadores para el control de potencia activa.
 - Realizar cambios en forma interactiva para la formación de nuevos casos.
 - Flujos lineales “de corriente directa” (P- δ) para el análisis de sistemas con problemas de convergencia.
 - Reportes de parámetros y condiciones de operación.
 - Reportes de resultados tabulares con diferentes niveles de detalle.
 - Reportes de violaciones en variables de interés.
 - Preparar archivos de condiciones iniciales para estudios de fallas y estabilidad.
 - Editar archivos mediante el uso de banderas lógicas.

En la figura 6.2. se presenta un diagrama esquemático de los módulos principales del modelo **FLUJOS**.

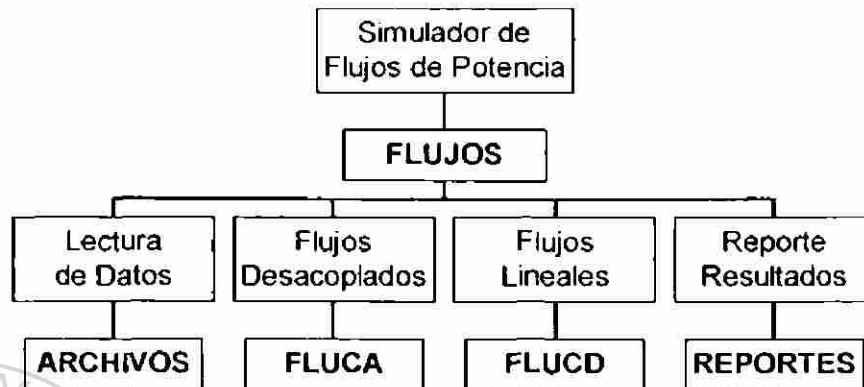


Figura 6.2. Diagrama Esquemático del Modelo **FLUJOS**

6.3.2. ESTUDIO DE FALLAS

Este modelo permite analizar el comportamiento de voltajes y corrientes en el sistema como resultado de la ocurrencia de fallas en algún punto de la red eléctrica. Las facilidades disponibles en este modelo permite realizar las siguientes actividades

- Efectuar estudios incluyendo condiciones de prefalla
- Evaluar el efecto de diferentes tipos de falla (paralelo y serie)
- Modelar fallas en diferentes fases (a,b,c)
- Inclusión automática del defasamiento causado por la conexión de transformadores.
- Modelación de efectos mutuos en líneas de transmisión en la red de secuencia cero.
- Obtención de niveles de corto circuito trifásicos y monofásicos.
- Cálculo de la impedancia equivalente de las redes de secuencia negativa y cero, vistas desde la secuencia positiva en el punto de falla.
- Modelación de protecciones de distancia y sobrecorriente.

En la Figura 6.3. se presenta un diagrama esquemático de las actividades principales en el modelo FALLAS.

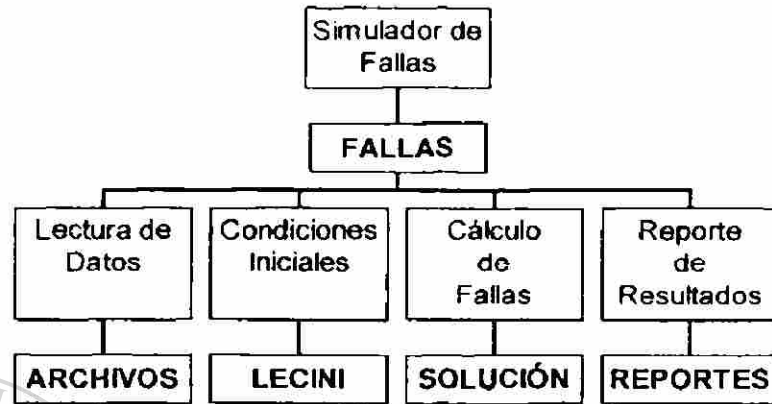


Figura 6.3. Diagrama Esquemático del Modelo FALLAS

6.3.3. ESTUDIO DE ESTABILIDAD EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

Este modelo permite evaluar el comportamiento dinámico del sistema ante diversos tipos de perturbaciones. Es un modelo completo que integra la dinámica de generadores y sus controles, obteniendo la respuesta en el tiempo de diversas variables eléctricas y mecánicas para evaluar la estabilidad del sistema.

El modelo fue diseñado para realizar diversos tipos de estudios mediante la selección adecuada de parámetros. Así es posible evaluar la respuesta transitoria de primera oscilación, el comportamiento dinámico de oscilaciones de potencia, y también permite evaluar la dinámica de la frecuencia al ocurrir una pérdida de generación.

Las facilidades disponibles en el modelo permiten realizar las actividades siguientes:

- Utilización de archivos de condiciones iniciales

- Modelación de generadores con diversos grado de complejidad
- Modelación de compensadores estáticos de potencia reactiva.
- Representación de la carga en forma individual mediante una combinación de representaciones típicas.
- Modelación de sistemas de excitación mediante modelos tipos IEEE.
- Representación de sistemas de estabilización para evaluar su efecto en el amortiguamiento de oscilaciones.
- Modelación de sistemas de gobernación de velocidad.
- Inclusión de protecciones de distancia para evaluar su funcionamiento ante oscilaciones de potencia.
- Modelación de relés de corte de carga por baja frecuencia.
- Resultado gráficos y tabulares en pantalla de variables eléctricas y mecánicas.

En la Figura 6.4 se presenta un diagrama esquemático del modelo ESTABI.

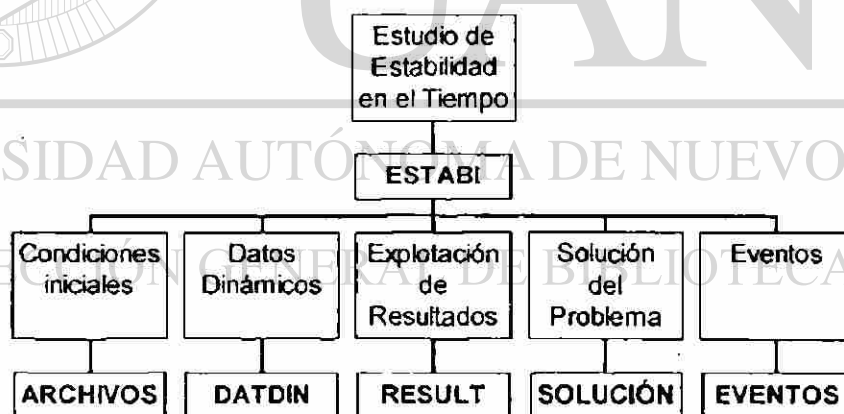


Figura 6.4. Diagrama Esquemático de Actividades del Modelo ESTABI.

6.3.4. ESTUDIO DE ESTABILIDAD EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.

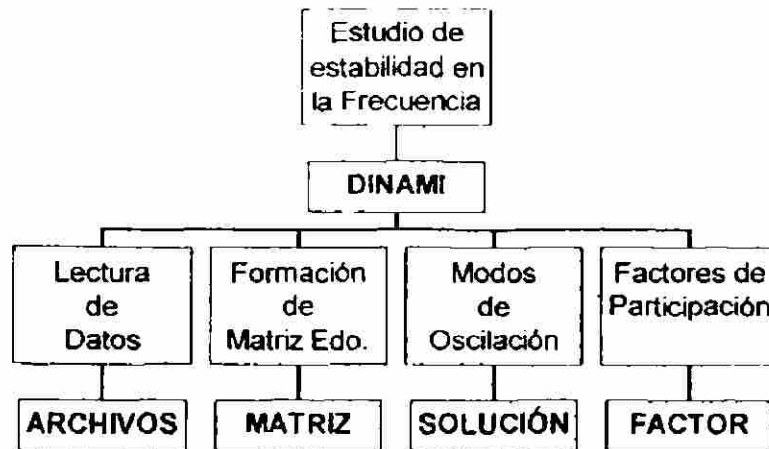
Este modelo permite evaluar el comportamiento dinámico del sistema, ante pequeñas perturbaciones, mediante la caracterización de la respuesta a través de frecuencias de oscilación y el amortiguamiento correspondiente a cada modo de oscilación.

La herramienta permite complementar los resultados de simulaciones en el tiempo, facilitando los procedimientos para lograr la estabilización del sistema a través de sistemas de control.

Las facilidades disponibles en el modelo permiten realizar las actividades siguientes:

- Obtener las frecuencias de oscilación correspondientes a los modos de oscilación electromecánicos de los rotores
- Determinar el amortiguamiento correspondiente a cada modo de oscilación
- Calcular los factores de participación de generadores y controles en cada modo de oscilación.
- Determinar los vectores característicos derechos para cada modo de oscilación.
- Modelación de generadores y controles con diverso grado de detalle
- Representación de Estabilizadores de Sistemas de Potencia (PSS) para el control de oscilaciones.

En la Figura 6.5. se presenta un diagrama esquemático del modelo **DINAMI**.



En la Figura 6.5 Diagrama esquemático del modelo DINAMI.

6.3.5. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.

El modelo **PARLIN** permite calcular los parámetros eléctricos de líneas de transmisión para ser utilizados en estudios de flujos, fallas y estabilidad. Las facilidades disponibles en el modelo permiten realizar las actividades siguiente:

- Cálculo del efecto inductivo serie
- Determinación del efecto capacitivo paralelo
- Parámetros en componentes de fase
- Parámetros en componentes de secuencia
- Resultados en p.u.
- Resultados en unidades reales
- Determinación del circuito equivalente con parámetros concentrados
- Modelado de grupos .

En la Figura 6.6. se presenta un diagrama esquemático del modelo **PARLIN**.

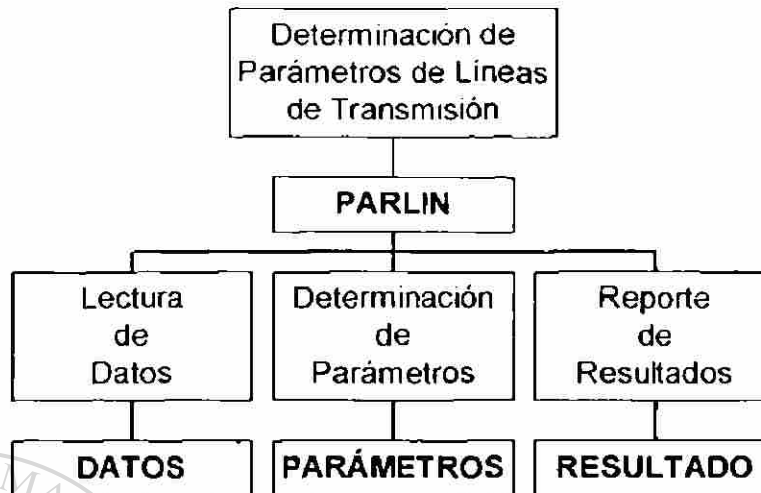


Figura 6.6. Diagrama Esquemático de Actividades del Modelo **PARLIN**.

6.4. MANEJO DEL MODELO FLUJOS DE POTENCIA.

El Modelo FLUJOS del Simulador Interactivo de Sistemas de Potencia (SISP) permite realizar el análisis en estado estable de una red eléctrica.

Siendo el estudio de Flujos de Potencia una aplicación básica en el análisis de sistemas de potencia, el modelo se ha diseñado para servir de enlace con otras aplicaciones, tales como: el Análisis de Fallas y los Estudios de Estabilidad Transitoria y Dinámica.

El modelo FLUJOS puede realizar el cálculo para obtener las características necesarias para la construcción de curvas. P-V y Q-V, indispensables en un gran número de estudios, para desarrollar estrategias operativas que nos ayuden a operar el sistema Eléctrico de Potencia en una región estable y a su vez nos permita explotar al máximo su capacidad de generación y transmisión de Potencia.

6.4.1. ACTIVIDADES.

El modelo se accesa desde el encadenador principal del simulador SISP mediante el comando **FLUJOS**. Por medio de la interfaz interactiva, el modelo permite realizar las actividades siguientes:

- Archivos
- Cambios
- Solución
- Reportes
- Ayuda

Al accesar la interfaz, sólo encontrarán en operación las actividades **Archivos** y **Ayuda**. Las otras opciones se ponen en operación al avanzar en las secuencias de ejecución.

6.4.2. ARCHIVOS

Este módulo permite la entrada de datos al modelo a través de un archivo de datos. Este archivo puede ser formado por cualquier editor de archivos de texto de la computadora, contiene la información de la topología y las condiciones de demanda y generación para el sistema en estudio.

De este módulo se despliega un menú con las siguientes opciones

- Leer Datos
- Grabar resultados
- Imprimir resultados
- Editar datos
- Salir

Al inicio de un estudio sólo se podrán leer o editar archivos de datos. Posteriormente se activan las funciones de grabar e imprimir resultados

Cuando se solicitan las funciones de lectura, editar y grabar, se presenta una ventana de diálogo donde aparecen los archivos que se pueden manipular. Las operaciones disponibles son:

Nombre	nombre del archivo elegido
Open	Abrir archivo
Cancel	Cancelar la lectura, edición o grabado
Files	Archivos posibles a elegir

6.4.3. CAMBIOS

Esta actividad permite modificar el caso de estudio sin modificar el archivo primario. Cuando se entra por primera vez se debe elegir el tipo de cambios que se desean. Estos puede acumularse sobre el caso anterior, o realizarse sobre el archivo base; cuando se elige el primer tipo, los cambios realizados con anterioridad se conservan.

Con el segundo tipo de cambios, siempre se lee el archivo base y los cambios se realizan a partir de este archivo

Una vez seleccionado el tipo de cambio deseado, es posible realizar cambios a:

- Generadores
- Cargas
- Topología
- Valores límite
- Taps dinámicos
- Control de voltaje con taps
- Líneas de interconexión
- Intercambios
- Nodos reguladores
- Transformadores defasadores

6.4.3.1 CAMBIOS EN GENERADORES.

Las variables eléctricas cuyo valor se puede cambiar en esta opción son:

- Potencia generada
- Potencia reactiva máxima
- Potencia reactiva mínima
- Voltaje de generación

Si se desea modificar una variable en todas las unidades de una planta, no es necesario proporcionar los nombres de todos los generadores, sino solamente activar la función

- Todas las unidades en alta

Al entrar la opción se debe especificar el nombre del generador y enseguida la variable o tipo de cambio deseado.

El cambio de valor numérico se realiza mediante la función **Aceptar**, una vez que se ha establecido el nombre, el tipo de cambio y si es en todas las unidades de la planta.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

6.4.3.2 CAMBIOS EN CARGAS

Los valores de potencia activa y reactiva en cargas se pueden cambiar con esta opción. Los tipos de cambio disponibles son:

- | | | |
|---|---------|--------------------------------------|
| • | Nodos | Uno a uno |
| • | Global | Todos los nodos de carga del sistema |
| • | Area | Nodos de un área dada |
| • | Subárea | Nodos de una subárea |

El cambio se puede realizar de las siguientes maneras:

- En por ciento (P y Q a la vez)
- FP (cambio de Q, P es fija)
- P y Q (valores nodales)

A menos que el cambio sea global, se deberá especificar el nombre del nodo, área o subárea.

Habiendo fijado el tipo de cambio, la forma, el nodo, área o subárea, el cambio se realiza con la función Aceptar.

6.4.3.3 CAMBIOS EN LA TOPOLOGÍA

Por medio de esta opción es posible realizar los siguientes tipos de cambios:

- Salida de líneas
- Reconexión de ramas
- Salida de generadores
- Reconexión de generadores
- Modificar elementos en derivación
- Desconexión de elementos en derivación
- Reconexión de elementos en derivación
- Cambios en taps de transformadores

Una vez que se especifica el elemento donde se hará el cambio, éste se activa con la función Aceptar.

6.4.3.4 CAMBIOS EN LÍMITES DE LÍNEAS Y NODOS.

Mediante esta actividad se pueden modificar los valores iniciales de los límites fijados para voltajes en nodos y flujos de potencia en líneas. Los tipos de cambio disponibles son:

- Modificar límites de voltaje
- Cambiar el lugar de medición (envío-recepción)
- Modificar límites de MVA
- Modificar límites de MW
- Modificar límites de Amperes

Una vez seleccionado el tipo de cambio y el nombre del nodo o línea donde se realizará, se utiliza la función **Aceptar** para efectuar la modificación.

6.4.3.5 CAMBIOS EN TAPS DINAMICOS.

Esta actividad se utiliza para realizar cambios en transformadores con cambiador automático de tap bajo carga. Los posibles cambios a realizar son los siguientes:

- Modificar tap máximo
- Modificar tap mínimo
- Modificar incremento del tap

Para realizar el cambio se debe elegir previamente el tipo de cambio y el nombre del transformador, la modificación se activa mediante la función **Aceptar**.

6.4.3.6 CAMBIOS EN NODOS CON CONTROL DE VOLTAJE MEDIANTE TAPS

Esta opción se realiza en combinación con la información presentada en la sección E). Dado un transformador con cambio automático de tap bajo carga, que controla el voltaje de un nodo determinado, se pueden modificar las siguientes variables:

- Voltaje a controlar
- Factor de sensibilidad
- Cambiar Transformador

Las dos primeras son variables numéricas. Para ejecutar el tercer tipo de cambio es necesario que existan dos o más transformadores con cambiador automático definidos en el archivo original.

La función Aceptar se utiliza para realizar cambios.

6.4.3.7 CAMBIOS EN EL CONTROL DE VOLTAJE CON GENERADORES.

Esta opción permite realizar cambios en nodos cuyo voltaje es controlado con generadores remotos. Se pueden efectuar cambios en las siguientes variables:

- Voltaje a controlar
- Factor de sensibilidad
- Cambiar generador

Para realizar el cambio sólo es necesario que el nódo especificado esté asociado, en el archivo de datos original, con al menos un generador para controlar el voltaje.

6.4.3.8 CAMBIOS EN LINEAS DE INTERCONEXIÓN

En esta opción es posible realizar cambios en :

- Lugar de medición
- Flujo máximo

El lugar de medición se puede seleccionar en cualquiera de los nodos extremos de la línea de interconexión. Debe señalarse que el control de intercambios se desactivará cuando el flujo en la línea excede el límite especificado

6.4.3.9 CAMBIOS EN INTERCAMBIOS.

En esta opción se puede cambiar el valor del flujo neto que entra (-) o sale (+) del área

- Flujo neto

Inicialmente se selecciona el nombre del área deseada y posteriormente el valor del flujo neto.

6.4.3.10 CAMBIOS EN NODOS REGULADORES

Para cada área de intercambio es posible efectuar los siguientes tipos de cambios:

- Factor de ponderación
- Factor de sensibilidad
- Generador regulador

Los factores de ponderación y sensibilidad afectan la manera en que los generadores reguladores contribuyen en el control de intercambios.

Esta opción permite cambiar un generador regulador por cualquier otro del área de interés. Los nombres de los generadores reguladores proporcionados en esta opción deberán estar definidos como nodos reguladores en el archivo primario de datos.

6.4.3.11 CAMBIOS EN TRANSFORMADORES DEFASADORES

Con esta opción se puede especificar el ángulo de defasamiento deseado para cualquier transformador del sistema.

6.4.4. SOLUCIÓN.

Esta actividad se accesa al oprimir simultáneamente las teclas < ALT – O >. Las opciones disponibles son:

- Flujos C.A
- Flujos C.D
- Cambios a la corrida
- Curvas P-V
- Curvas Q-V

6.4.5. REPORTE.

Esta actividad se accesa normalmente después que se completa el estudio de Flujos de C.A., o C.D. Los reportes disponibles son:

- Flujos de potencia
- Parámetros
- Resumidos
- Pérdidas
- Violaciones
- Reporte del archivo primario

Si no se ha efectuado la solución de flujos (C.A. ó C.D.) sólo estará disponible la opción **Reporte del archivo primario**. Las otras opciones se activan únicamente al resolver el estudio de Flujos.

Después de coompletar una solución de flujos de C.D. se dispone a través de la interfaz, de los siguientes reportes:

- Reporte de flujos
- Reportes de violaciones de ángulo

La opción **Reportes de Flujos** presente el flujo de potencia real y la diferencia angular en todas las ramas del sistema

En el segundo tipo de reporte, el usuario proporciona un valor de diferencia angular (en grados) y el programa lista todas aquellas ramas cuya diferencia angular excede de este valor.

6.4.6. ENTRADA DE INFORMACIÓN.

A continuación se presentan los formatos usados por el programa en la lectura del archivo primario. Para cada tipo de dato se incluye :

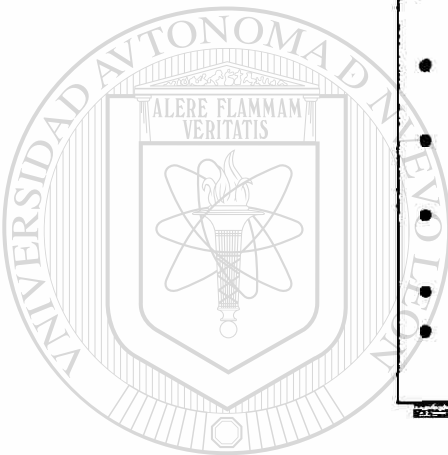
- a) el nombre
- b) formato
- c) descripción de cada variable
- d) columna donde se ubica el dato.

Todos los números enteros se ajustan hacia la derecha y los alfanuméricos a la izquierda. Los campos de punto flotante requieren punto decimal. La única restricción en

número de punto flotante es que se ubiquen dentro del campo especificado. El número de decimales proporcionados no es restrictivo.

El archivo primario de datos está formado por las siguientes secciones:

- Descripción del caso de estudio
- Nombre de las áreas
- Datos nodales
- Datos de generadores
- Datos de líneas y transformadores
- Elementos en derivación
- Transformadores con cambio de tap bajo carga
- Nodos con control de voltaje mediante taps de transformadores
- Nodos con control de voltaje mediante voltajes de generación.
- Líneas de interconexión y puntos de medición.
- Intercambio de potencia activa entre áreas
- Nodos reguladores /áreas



A excepción de las dos primeras secciones, cada nueva sección de datos se anuncia mediante la línea de cambio de información. Esta línea contiene la etiqueta "FIN", ubicada a partir de la columna tres.

6.4.7. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

Existen varias opciones en el reporte de resultados del estudio de flujos:

- Reporte completo
- Reporte de subárea
- Reporte por nodo
- Reporte por área
- Reporte de interconexiones

Cuando no existe convergencia en la solución, el reporte nodal incluye una indicación del DESAJUSTE en los nodos donde la desviación nodal de potencia exceda 0.5 MW. El reporte presenta, además de la indicación de desajuste, las desviaciones de potencia activa y reactiva en ese nodo.

Es importante mencionar que los reportes por área y subárea requieren la identificación correspondiente de los nodos de interés en el archivo primario de datos.

En todos los reportes se incluye siempre la identificación del caso de estudio que se especifica en el archivo primario de datos

Adicionalmente a los reportes de flujos, el modelo permite obtener, para una mejor documentación de los estudios, los siguientes reportes:

- Reportes de parámetros
- Reportes Resumidos
- Reporte de violaciones
- Reporte de pérdidas

El reporte de parámetros es representado en forma tabular. A opción del usuario se presenta el reporte completo de todo el sistema o a nivel de nodo. El reporte incluye los valores de resistencia, reactancia serie, susceptancia en derivación, valor del tap para cada transformador y una lista de los elementos en derivación.

Dentro de los reportes resumidos se incluyen:

- Reportes de generadores
- Reportes de parámetros
- Reportes de nodos
- Reportes de islas

El reporte de generadores incluye el voltaje (magnitud y ángulo), potencia generada y límites de reactivos para cada unidad generadora en el sistema.

El reporte nodal presente el voltaje (magnitud y ángulo de fase) y la potencia de carga en cada nodo de la red.

El reporte de violaciones, incluye la lista de las ramas que excedan algún valor límite establecido de MW, MVAR o Amperes.

El reporte por islas presenta un resúmen de potencia de carga y generación y pérdidas, para todas las islas eléctricas en el sistema. Se incluye también el reporte a nivel de áreas.

En el reporte de pérdidas, el usuario tiene las siguientes opciones disponibles:

- Reporte completo
- Reporte por área
- Reporte por subárea
- Reporte por elemento

6.4.8. SECUENCIAS DE EJECUCIÓN

Si se presenta las secuencias de ejecución típicas en la utilización del modelo de **FLUJOS**. Se indican las condiciones de aplicación en cada caso

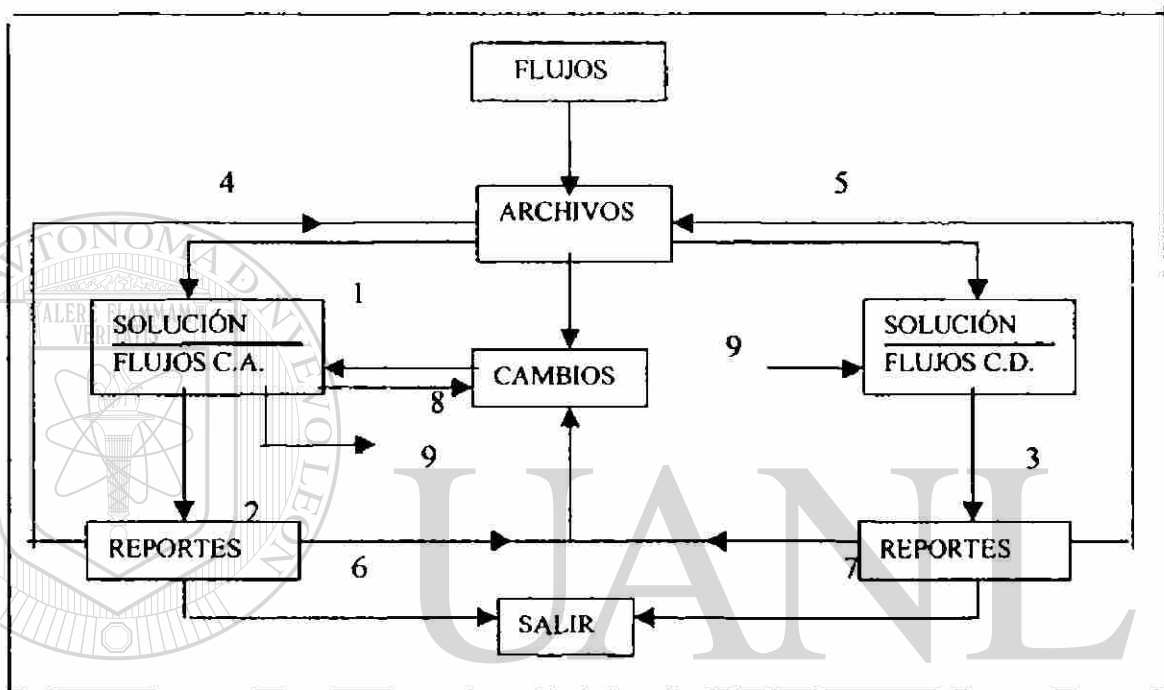
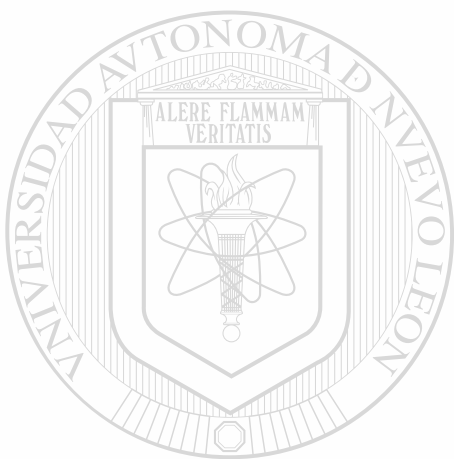


Figura 6.7. Secuencia de ejecución del modelo **FLUJOS**.

1. Se inicia el estudio de flujo de potencia con archivo de datos previamente creado.
2. Se realiza un estudio de flujos de C.A. completo.
3. Se efectúa un estudio de flujos lineal de potencia activa.
- 4-5. Se decide realizar el estudio con otros datos
- 6-7. Después de observar los resultados del estudio se decide modificar algunos datos.
8. Al tener problemas de convergencia, se decide hacer cambios en los datos.

- 9 Por problemas de convergencia se decide efectuar un estudio de flujos de potencia activa.
- 10 A partir de un caso base conocido el estudio se inicia modificando datos.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En la Figura 6.8. se puede apreciar la inyección de potencia activa y potencia reactiva a la zona metropolitana para el caso de tener la red actual y completa.

Se puede apreciar en la zona de 115 KV., voltajes con un valor inestable, como en los nodos de:

PZA	112.39 KV.
TEC	112.54 KV
VDG	111.25 KV
JER	110.16 KV
JEP	112.33 KV
MTY	112.50 KV
MTY	113.46 KV
NIC	113.43 KV

Tabla 1. Tabla de voltajes en nodos principales en la red de 115 KV.

En la tabla 2 se puede apreciar las condiciones que se tenían en ese momento en las unidades de generación que comprenden a la zona metropolitana, lo cual nos da una idea de las condiciones del sistema eléctrico de potencia en el momento analizado

En la tabla de referencia (tabla 2) observaremos las características del generador conectado a la red de 115 KV.

NODO	VOLTAJE KV	COMPLEJO GRADOS	POTENCIA MW	GENERADA MVAR	LIMITES MVAR	SP E INF MVAR
ALT-U2	16	-13.36	119	-15.6	80	-80
ALT-U3	20	-13.02	227	28.3	100	-100
ALT-U4	20	-12.79	238	-25.4	100	-100
STO-U1	13.8	-16.29	9	0.4	3	-3
ETK-U1	14	-15.54	72	34.9	60	-40
REC-U1	20.4	-11.9	286	38.1	90	-90
REC-U2	20.4	-11.92	284	37.9	90	-90
REC-U3	20.4	-11.26	295	18.3	90	-90
REC-U4	20.4	-11.16	298	18.6	90	-90
CBD-U1	20.4	-10.67	349	22.6	100	-100
CBD-U2	20.4	-10.63	352	22.9	100	-100
CBD-U3	20.4	-13.74	155	9.2	100	-100
CBD-U4	20.4	-14.54	104	7.3	100	-100
MTY-U1	13.9	-29.14	66	29.9	30	-30
MTY-U2	13.9	-29.17	65	29.9	30	-30
MTY-U3	13.9	-29.11	67	29.9	30	-30
MTY-U4	13.9	-31.47	67	30	30	-30
MTY-U5	13.9	-31.51	66	30	30	-30
MTY-U6	13.9	-31.32	72	30.1	30	-30
HUI-U1	14.1	-25.97	58	13.3	35	-35
HUI-U2	14.1	-25.78	58	13	35	-35
HUI-U3	14.1	-25.89	59	13.4	35	-35
HUI-U4	14.1	-25.95	57	13.1	35	-35
HUI-U5	14.1	-22.68	119	21.6	60	-40
HUI-U6	14.1	-26.64	139	43.3	60	-40
HDO-U1	14.1	-24.63	209	25.7	100	-100
HDO-U2	14.1	-25.17	183	23.9	100	-100
JER-U3	13.6	-33.35	27.9	15.1	15	-15
JER-U4	13.6	-32.61	33.9	15.1	15	-15
FAM-U3	1	-32.65	4	3.5	4	-3
RIB-U1	14	-31.68	28	4	18	-15
RIB-U2	14	-30.91	34	4.4	18	-15
RIB-U3	20.3	-28.73	284	40.7	110	-110
RIB-U4	14	-30.88	125	16.3	60	-40
AMI-U1	13.1	-23.24	21.9	8.1	8	-8
ADC-U12	13.8	-26.28	19	6	6	-6
ESP-U1	13.8	-19.25	11	3	3	-3
MON-U1	13.8	-23.44	20	1.9	8	-8
MON-U2	13.8	-23.06	23	2	8	-8
TEC-U1	13.7	-31.06	25	8	8	-8
LEO-U1	13.7	-31.76	11	3	3	-3
LEO-U2	13.7	-31.76	11	3	3	-3
FUN-U1	13.8	-31.85	11	3	3	-3
UNI-U12	13.4	-32.33	22	6.1	6	-6

Tabla 2. Características del Generador Conectado a la red de 115 KV.

En la Figura 6.9 se analiza el nodo PZA- 115 KV por medio de la construcción de la curva P - V, la cual se construye con datos reales, tomados del sistema analizado y nos muestra un panorama de la inyección de potencia a ese nodo y la relación de voltaje que se presenta entre la carga y el voltaje.

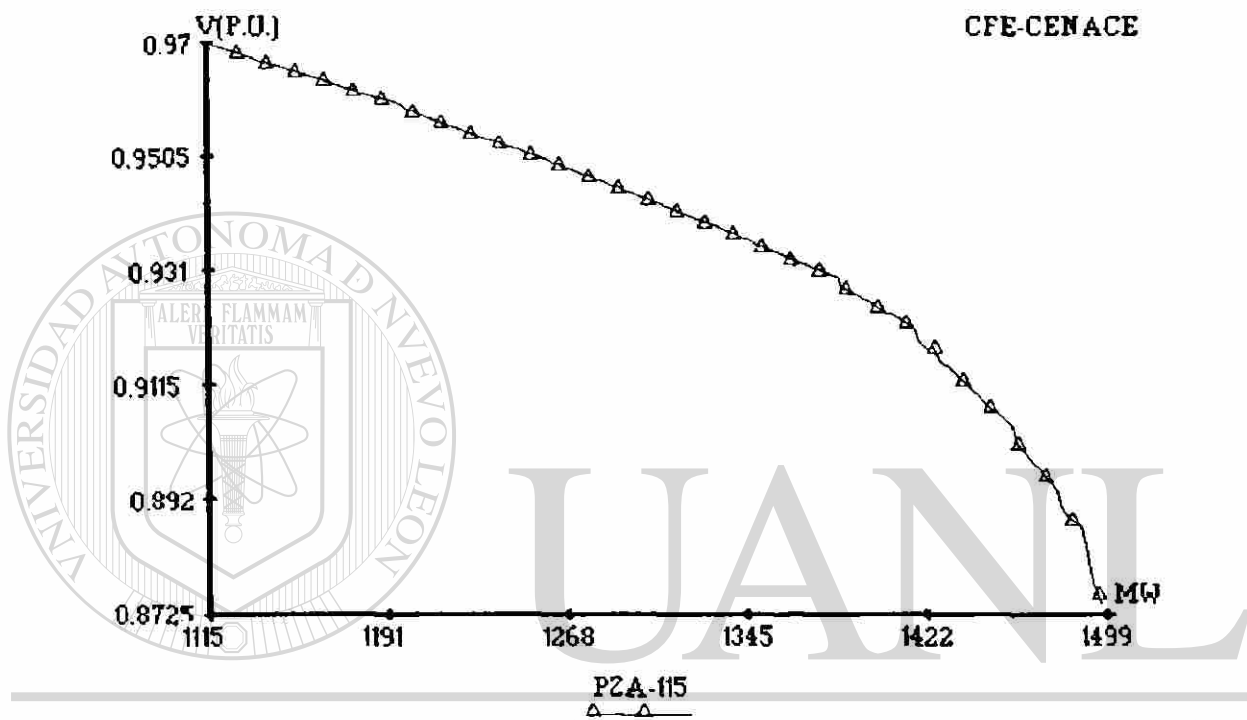


Figura 6.9. Nodo PZA-115

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En la Figura 6.10 se analiza el nodo Tec - 115-KV, por medio de la construcción de la curva Q-V. La cual nos muestra un panorama de la reserva de potencia reactiva que se presente en ese nodo y nos ayuda a establecer una condición de operación para poder mantener el valor del voltaje dentro de los límites operativos

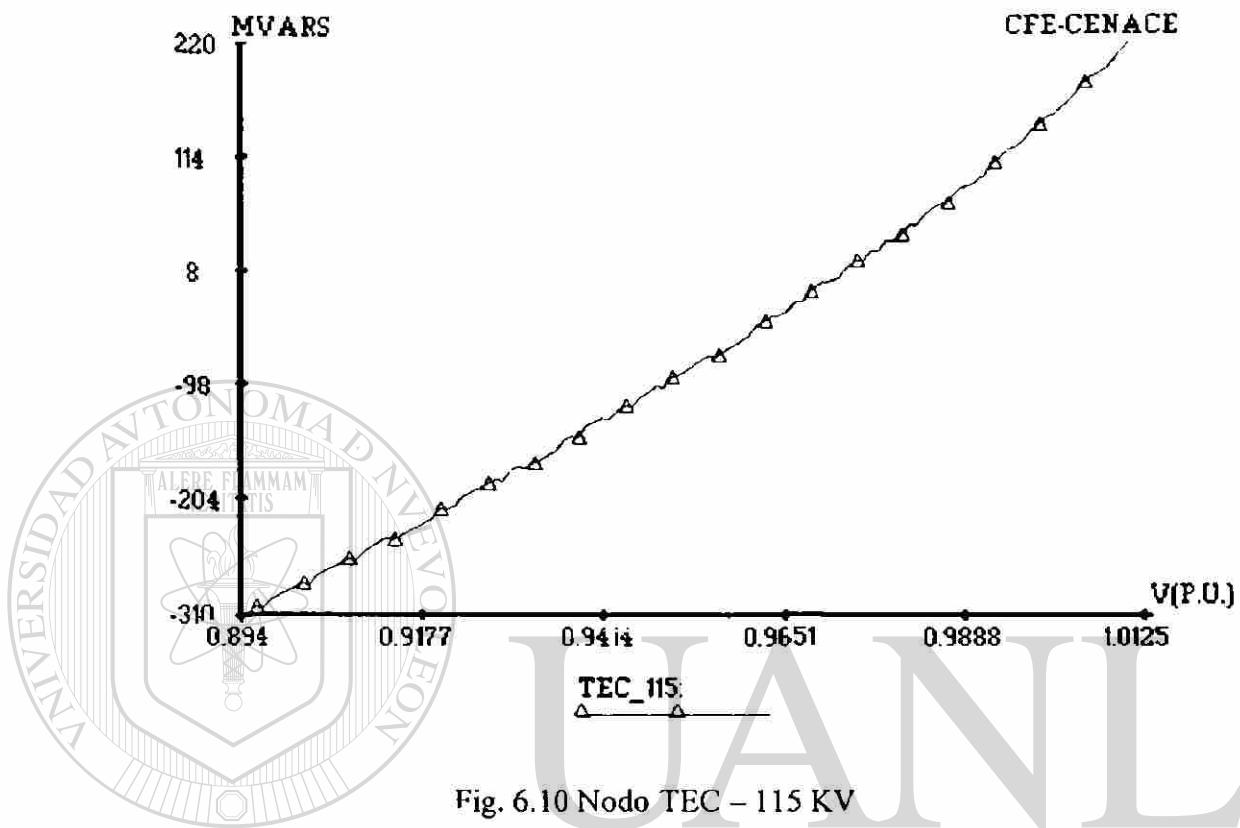


Fig. 6.10 Nodo TEC – 115 KV

6.5.2. ANÁLISIS

En la figura 6.8. para la red actual, tenemos una condición de inyección de potencia a la zona metropolitana, como consecuencia de la inyección, se presenta un abatimiento de voltaje en nodos importantes de la zona metropolitana.

6.5.3. PROPUESTAS

Como primera estrategia para mantener el nivel de voltaje dentro de los límites operativos, se procede a incrementar el voltaje de excitación en los generadores que están inyectando potencia reactiva a la zona metropolitana de un valor de 1.02 P.U. de

voltaje a 1.04 P.U de voltaje de generación, lo cual nos ayuda a incrementar la inyección de potencia reactiva a la zona metropolitana.

Como segunda estrategia, se procede a realizar cambios de Tap en los Autotransformadores que estan inyectando potencia reactiva a la zona metropolitana, con esto permitimos una mayor inyección en dicha zona, y de esta manera ayudamos a mejorar el perfil de voltaje. Se realiza cambio de Tap del 1.00 P.U. a .985 P.U. a los siguientes Autotransformadores:

NIC	2 TRA	400/115 KV	375 MVA
PZA	2 TRA	400/115 KV	225 MVA
VDG	1 TRA	400/115 KV	375 MVA
ESC	2 AT'S	230/115 KV	100 MVA
TEC	2 AT'S	230/115 KV	100 MVA
HUI	3 AT'S	230/115 KV	100 MVA

Tabla 3. Lista de Transformadores y Autotransformadores conectados a la red de 115KV

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

6.5.4. CONCLUSIONES.

DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS

En temporadas de demanda máxima, la inyección de potencia a la zona metropolitana es muy alta, y como consecuencia, los valores de voltaje pueden llevar a valores de operación críticos. En el caso analizado, los voltajes en la red de 115 KV, estan bajos; al aplicar la estrategias los valores regresaron a su rango normal de operación. Esto nos ayuda a tener un panorama mas claro, que pueda interpretar el operador del sistema eléctrico, así al tener cierta cantidad de potencia inyectando a la zona metropolitana podrá elegir estrategias más rápidas y adecuadas para mantener sus voltajes estables.

6.6. RESUMEN.

En este capítulo se ha presentado la descripción completa de la estructura del Simulador Interactivo de Sistemas de Potencia, nos muestra en una forma auto-didacta la forma de manejar el SISP.

Dicho simulador es en la actualidad una herramienta de apoyo y de mucha utilidad para los estudios de sistemas eléctricos de potencia, mediante el cual podemos obtener las características geográficas del sistema P-V y Q-V. Lo cual nos proporciona un panorama del comportamiento de sistemas de potencia.

Se mostró la red actual de 115 KV de la zona metropolitana en un caso base así como las condiciones de voltaje que se tenían en ese momento; se aplican las estrategias operativas propuestas para mejorar la condición de operación y se muestran los resultados en la condición de voltaje en la red de 115 KV.

Por último, se realizó el análisis de las conclusiones obtenidas.

CAPÍTULO 7

ALTERNATIVAS Y PROPUESTAS

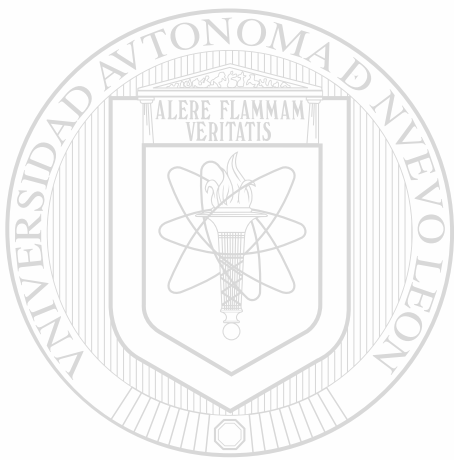
7.1. INTRODUCCIÓN

Existen diferentes alternativas de solución al problema de control de voltaje en un Sistema Eléctrico de Potencia, así como distintas estrategias de solución, en este capítulo se analizan casos de estudio en el Sistema Eléctrico de Potencia actual analizando condiciones de operación en demanda máxima real, presentando las características que se tiene en el momento del análisis, se presentan las curvas P-V para diferentes condiciones de operación y presentar a los operadores el panorama que se tiene en el Sistema eléctrico de Potencia al encontrarnos en demanda máxima.

El objetivo de este capítulo es desarrollar estrategias operativas que se utilizan en la actualidad y poder establecer límites operativos que ayuden al operador del sistema Eléctrico de Potencia, a evitar operar en una condición crítica que nos acerca a una inestabilidad de voltaje, previendo una posible contingencia en la red lo cual nos llevaría a la inestabilidad de un colapso de voltaje, esta es la razón de la importancia de poder determinar los límites operativos seguros en los cuales los operadores de área se deben basar.

En el presente capítulo se analizan casos para determinar los límites operativos en los cuales el Sistema se encuentra en las mejores condiciones operativas, utilizando el

Simulador Interactivo de Sistemas de Potencia el cual nos brinda un apoyo para poder desarrollar las estrategias operativas, para poder aplicar las medidas de solución que se obtenga se tomó en cuenta la experiencia de los operadores del Área de Control Noreste (ACNE) de la comisión Federal de Electricidad. Se analizan los antecedentes, las gráficas P-V las cuales nos brindan un panorama de la condición del perfil de voltaje se analizan las conclusiones de los estudios de los casos realizados.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

7.2. CASO 1: DETERMINAR EL LIMITE DE TRANSMISIÓN ENTRE LAS LÍNEAS DE 400 KV. ALT –GUE MAS LA GENERACIÓN DE LAS CENTRALES REC Y CBD PARA DEMANDA MÁXIMA VERANO 2000, CONSIDERANDO LA ENTRADA EN OPERACIÓN DEL CEV EN GUE EN 400 KV

7.2.1. ANTECEDENTES.

La demanda esperada para el verano del 2000 es de 5138 MW la generación disponible es óptima, ocho unidades entre REC Y CBD con 2460 MW el resto de la generación se considera disponible así como la entrada de dos nuevas turbogases de 150M, una para HUI-115 y la otra para RIB-138, el envío al ACNE esta en 372 MW, los flujos que se esperan se presentan en las líneas de 400 KV del ATL a GUE son de 596 MW, en la Fig. 7.1, se muestra el panorama para el ACNE que se tiene contemplado se presenta para este nivel de demanda y generación.

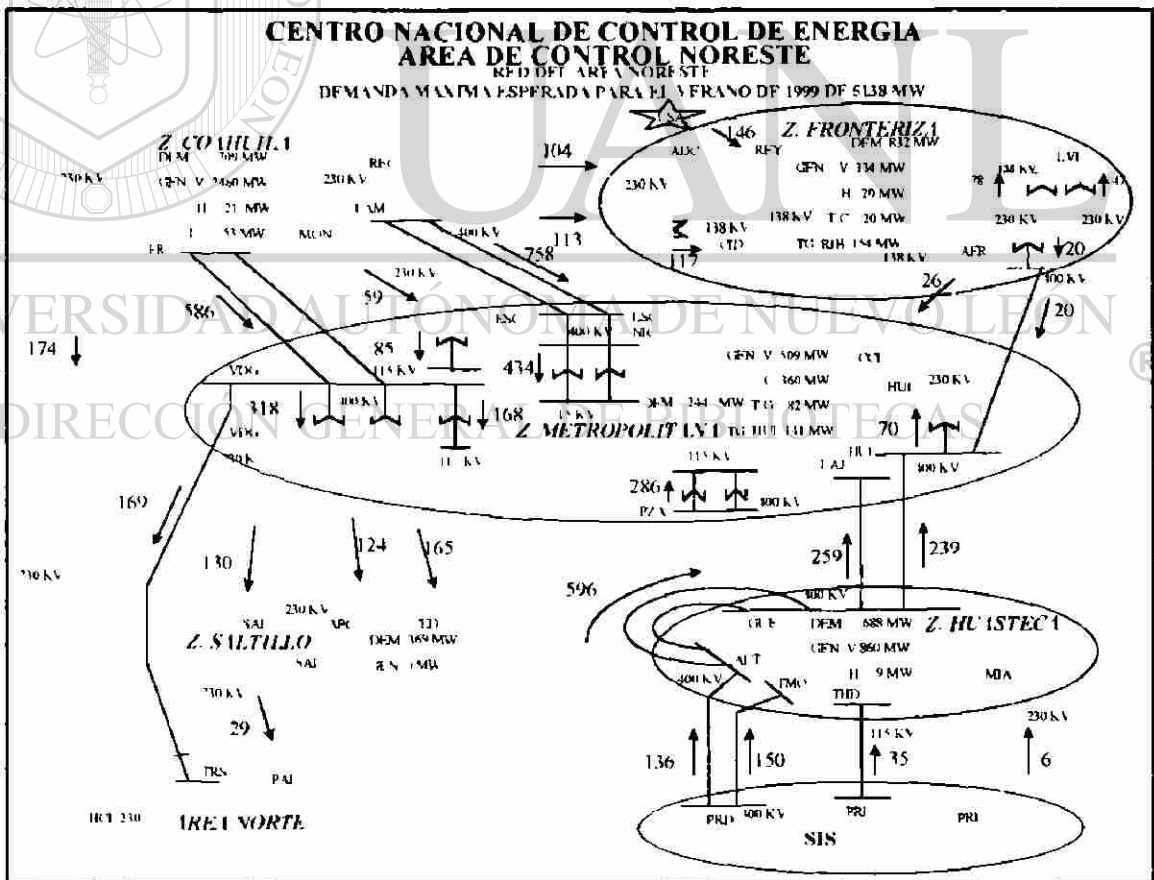


Fig. 7.1 Flujos esperados para el verano 2000

El límite de transmisión generación (LTG) resulta de la suma de potencia activa (megawatts) de las dos líneas de 400 KV de ALT a GUE más la generación de las plantas de REC Y CBD.

7.2.2. CONCLUSIONES.

El LTG resultante de este estudio aumenta de 3210 MW debido a la entrada en operación del CEV en GUE 400KV de +300 a -90 MVAR. El LTG. Está establecida para evitar problemas de bajos voltajes entre pérdida de generación natural o debida a la operación de alguno de los esquemas de Disparo Automático de Generación establecidos (DAG 1, DAG 2 Y DAG 3) para las centrales de REC Y CBD, el esquema de DAG que al operar presenta mayores problemas de bajos voltajes es el DAG 2. Estos tres esquemas previenen la pérdida de estabilidad transitoria el perder líneas de 400 KV en la Sub-área Coahuila y manda disparo sobre unidades de las centrales de REC o de CBD, sin embargo después de solucionar los problemas de estabilidad angular de las centrales de REC y CBD se originan problemas de bajos voltajes principalmente en las zonas de victoria y de la Metropolitana de Monterrey, esto es resultado de sobrecargar las líneas de 400 KV, principalmente de PRD a ALT, ALT a GUE y de GUE a HUI.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

7.2.3. ANÁLISIS EN ESTADO ESTABLE.

Al llevarse a cabo la operación de alguno de los DAG'S y tener condiciones de alta demanda en el ACNE se pueden llegar a presentar flujos altos en las líneas de 400 KV de ALT a GUE lo que puede provocar que el voltaje en GUE-400 presente un abatimiento importante de voltaje por se un punto intermedio y sin soporte de generación el cual puede llegar a valores que originen inestabilidad de voltaje (colapso).

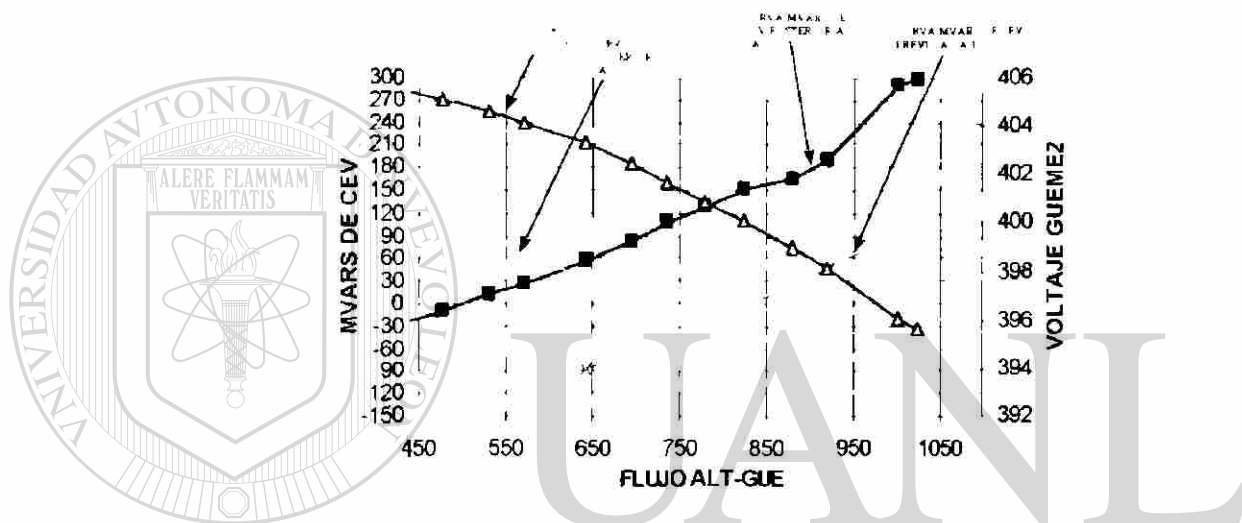


FIG. 7.2. Curvas PV y MVAR'S del CEV en GUE -400.

En la figura 7.2. se muestra en el eje de la Y (lado derecho) el comportamiento del voltaje en GUE en función del flujo de las líneas de 400 LV de ALT a GUE en el eje de las X, también se muestra en el eje de las Y (lado izquierdo) el comportamiento de los MVAR'S aportados o consumidos por el nuevo CEV en GUE-400 el cual tiene una capacidad de 300 MVAR'S capacitivos y 200 MVAR'S reactivos con una pendiente del 1% en su característica de operación en función del mismo flujo de ALT a GUE, se presenta el comportamiento de antes y después de haber operado el DAG2, todo una condición de demanda máxima de 5138 MW para el ACNE, éstas gráficas mostradas en la fig. 7.3. y 7.4. nos demuestran que podemos tener un LTG de 3460 MW siempre y cuando se tenga el CEV en GUE-400 en servicio.

En las siguientes gráficas PV de las fig. 7.3. y 7.4. se muestra el flujo en MW de las líneas de ALT a GUE y el voltaje en GUE-400 en KV.

CURVA PV CON DEMANDA DE 5138 MW SIN CEV EN GUE-400 CON UNA LINEA DE ALT-GUE FUERA

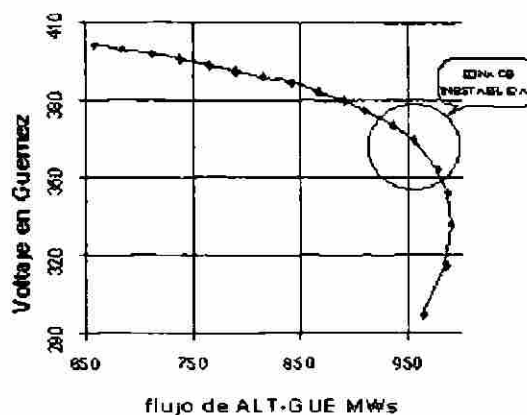


Fig. 7.3. Curva PV voltaje en GUE-400 sin CEV con una línea de 400 KV de ALT a GUE fuera.

En la figura 7.3. se muestra el efecto sin tener el CEV operando en GUE-400 y ocurrir un detrimento en la generación principalmente en las centrales de REC, CBD o RIB o bien en alguna central importante del Área de Control Norte, originarían detrimentos de voltaje pronunciados en la S.E. GUE (Zona victoria) debido al incremento de flujo de potencia activa en las líneas de 400 KV de PRD a ALT, de ALT a GUE y de GUE a HUI donde dicho detrimento en el voltaje limita el flujo de las líneas mencionadas (ALT a GUE) en 750 MW en la Figura 7.4. se muestra la misma contingencia de pérdida de generación anterior pero ahora teniendo en operación el CEV de GUE-400, mostrando un detrimento del voltaje menos pronunciado, por el incremento del flujo de potencia en dichas líneas principalmente de ALT a GUE, éste beneficio de tener el CEV en GUE amplía el LTG hasta 3460 MW.

En La figura 7.4. se presente el efecto en estado estable para demanda máxima la pérdida de una de las dos líneas de 400 KV de ALT a GUE manejando flujos previos de 1000 MW entre las dos. de la cual podemos comentar que dicha contingencia es soportable para estado estable sobre la base del criterio de curva P-V.

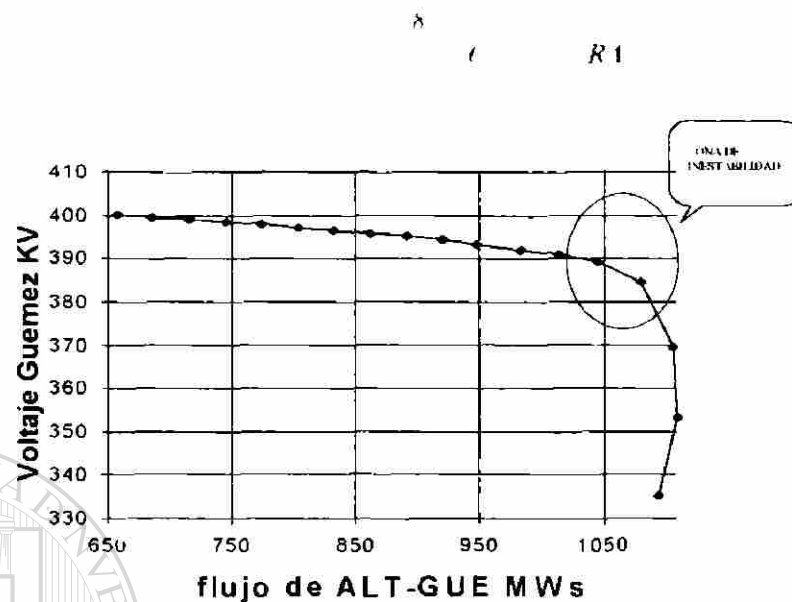


Fig. 7.4. Curva PV voltaje en GUE-400 con CEV con una línea de 400 KV de ALT a GUE fuera .

En la fig., 7.5. se muestra de nuevo la gráfica P-V del comportamiento del enlace de Altamira a Güemez, pero ahora partiendo de un voltaje de control por el CEV de GUE-400 KV, en donde podemos observar por ejemplo para 900 MW de flujo entre dos líneas se tiene un voltaje de 409 KV y el CEV esta aportando 50 MVAR'S, en esta gráfica podemos observar las condiciones del voltaje en SE. GUE en las condiciones de tener el enlace con una y dos líneas conectadas así como los MVAR'S que aporta o consume el CEV de Güemez.

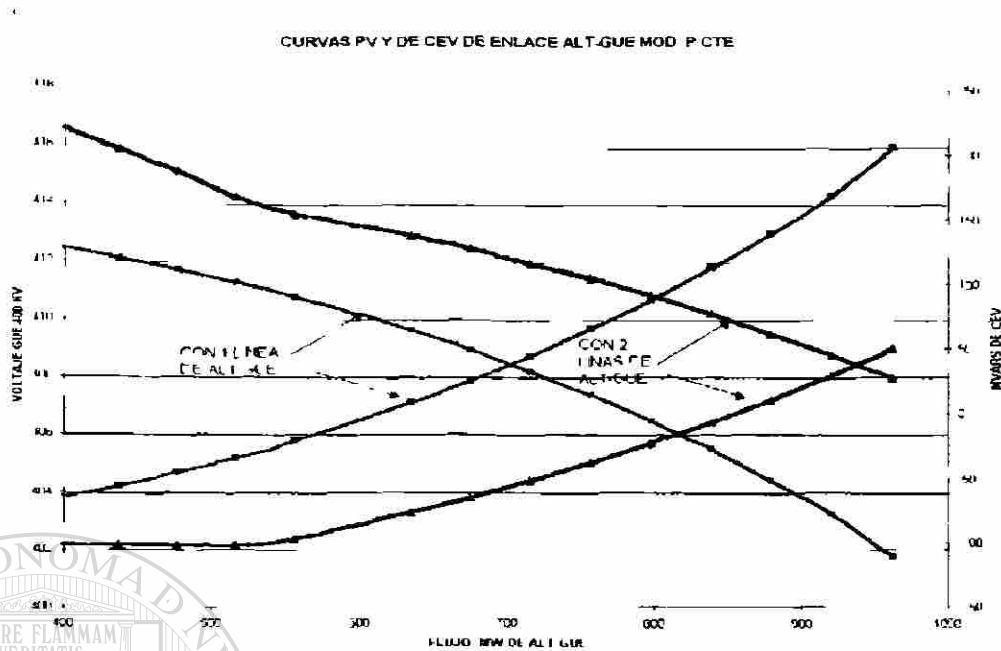


Fig. 7.5. Grafica P-V del comportamiento del enlace de Altamira a Güemez.

7.2.4. CONCLUSIONES.

El resultado de este estudio nos presenta que para mantener el valor del voltaje en la zona metropolitana de Monterrey y la zona victoria dentro de los límites operativos se tienen que respetar ciertos límites de transmisión entre ALT y GUE.-

De no contar con el CEV de GUE en operación se quedarían el LTG en 3150 MW y un flujo máximo entre las dos líneas de 400 KV de ALT a GUE de 750 MW.

El límite máximo permitido de transmisión entre ALT a GUE sin contar con el CEV y sólo una línea entre ALT a GUE quedaría en 750 MW.

El límite máximo permitido de transmisión entre ALT a GUE con el CEV en operación y sólo una línea entre ALT a GUE quedaría en 950 MW.

7.2.5. PROPUESTAS.

Al analizar los resultados obtenidos se tiene la necesidad de respetar los límites establecidos para evita operar el sistema Eléctrico de Potencia en condiciones críticas y al tener una contingencia nos pueda llevar a un colapso de voltaje. A continuación se propone un esquema de tiro de carga manual de emergencia para poder regresar a un estado seguro de operación, este tiro de carga se realiza por los operadores del Sistema Eléctrico de Potencia desde el centro de control.

Con este tipo de estudios se establecen las límites máximos permitidos para operar en un estado seguro y poder soportar una contingencia en la red actual y nos permite mantener a los operadores informados de las condiciones que se esperan año con año y brindar un panorama de la forma que se tiene que operar, para evitar mayores problemas en el Sistema de Potencia.

A continuación se presenta una lista de cargas que se pueden tirar en forma manual y de emergencia para poder permanecer en los límites de transmisión de potencia permitidos:

TIRO DE CARGA MANUAL DE EMERGENCIA

ZONA METROPOLITANA

NODO	EQUIPO	CARGA	MEDICION	TIPO
NIC	L,A3980	HAP	248 MW	INDUSTRIAL
PZA	L,73670	LOL	35 MW	RESIDENCIAL
MTY	L,73050	DON	97 MW	IND/RES
DON	L,73800	IMO	40 MW	INDUSTRIAL
NOG	L,73310	APM	36 MW	INDUSTRIAL
VDG	L,73260	ARV	35 MW	INDUSTRIAL
ESC	L,73880	PEP	15 MW	IND/RES

ZONA SALTILLO

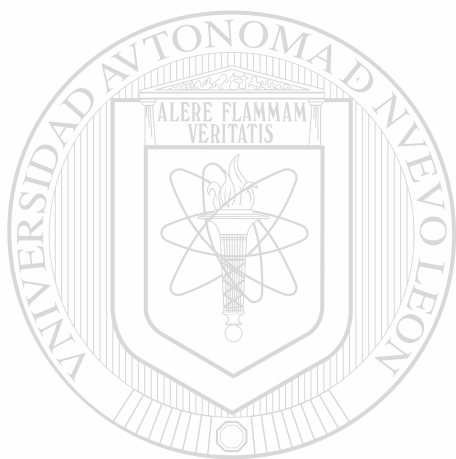
NODO	EQUIPO	CARGA	MEDICION	TIPO
CED	L,73360	LLN	12 MW	RURAL

SAL	L.73150	ZPL	43 MW	RURAL
SAL	T-5	SAL	17 MW	RESIDENCIAL
SAL	T-7	SAL	13 MW	RESIDENCIAL

ZONA VICTORIA

NODO	EQUIPO	CARGA	MEDICION	TIPO
GUE	L,73510	JIM	10 MW	RURAL

Tabla 4 . Tiro de carga manual de emergencia.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



7.3. CASO 2: DETERMINACIÓN DE ESQUEMA DE DESCONEXIÓN DE CARGA POR BAJO VOLTAJE EN LA ZONA METROPOLITANA.

7.3.1. ANTECEDENTES.

El presente reposte plantea un análisis con una condición de Demanda de 4680 MW ante esta condición se realiza un análisis para determinar la estabilidad de voltaje en contingencias en la red de 400 KV.

Al tener la salida de una o más líneas en la Red de 400KV y particularmente al salir dos líneas (contingencia doble) en los tramos de: REC-FRO, CBD-FRO, CBD-LAM, LAM-ESC, FRO-VDG, es necesario hacer disparos de Unidades Generadoras de la Planta Río Escondido y /o Carbón dos según se muestra en la tabla, por lo que es necesario establecer que medidas tomar a fin de evitar problemas de estabilidad de voltaje de la zona metropolitana.

7.3.2. CONDICIONES DEL ESTUDIO.

La condición esperada de inyección a la zona metropolitana será de 3000MW con un flujo de 480 MW para éste estudio en las líneas entre ALT-GUE de 400 KV y una generación entre Río Escondido y Carbón Dos de 2520 MW. La red que se utilizó para el presente estudio fue la mas conocida de las obras que están por entrar por ejemplo la línea de Río Escondido a Hércules en 230 KV que posteriormente se pasará a 400 KV, se considera el cambio de salida de una de las dos líneas de 400 KV de Río Escondido a Frontera, la cual saldrá ahora de Carbón Dos a Frontera, se considera el cambio de uno de los tres autotransformadores de Arroyo del Coyote de 230/138 Kv de 100 MVA a la subestación de Lauro Villar, se consideran en San Nicolás dos transformadores de 375 MVA de 400/115 Kv, en Plaza dos transformadores de 400/115 Kv de 225 MVA, La entrada del transformadores de Tramos de 225 MVA de 400/115 Kv, el autotransformador de ciudad Industrial de 225 MVA de 230/138 Kv así como el

segundo autotransformador de Rió Escondido de 400/230 Kv. El presente reporte cubre los niveles de demanda de 4500 y 4681 MW.

7.3.3. ANÁLISIS EN ESTADO ESTABLE.

El estudio en estado estable se realizó para obtener la carga operativa que relaciona generación de estas centrales REC y CBD y los flujos previos de potencia activa en las líneas de 400 KV entre ALT-GUE. Ante la operación de disparos de generación anticipando el resultado a un valor de 3000MW, el cual fue logrado al asociar la operación del DAG-2 sobre dos unidades de CBD con un disparo de carga por bajo voltaje de 350 MW y de Hylsa Potencia y 50 MW también obligados en la Zona Metropolitana.

En la siguiente tabla se muestra un esquema de desconexión de carga por bajo voltaje, necesario para mantener la estabilidad de voltaje en estado estable ante las condiciones posteriores a la operación del DAG-2 y al tener una demanda superior a 4500 MW en la que se muestra el voltaje al cual debe dispararse la carga tanto en NIC-400 y VDG-115 donde se proponen se hagan tiros de carga.

ESQUEMA DE DESCONEXION DE CARGA POR BAJO VOLTAJE EN LA ZONA METROPOLITANA CON DEMANDA DE 4687 MW PARA DAG2

Con Línea Hércules Dem. 4680 MW									
DAG2	LTG	VOLTAJE DE COLAPSO KV		CARGA MIN. DISPARAR MW		CARGA SUGERIDA DISP. MW		VOLT. DESP DE DISP. CARGA SUGERIDA. KV	
CBD	MW	NIC-400	VDG-115	HYLSA	VDG-115	HYLSA	VDG-115	NIC-400	VDG-115
1 unidad	2800a	386.4	111.6	336	0	350	52	394.7	114
1 unidad	3000b	384	112.7	350	0	350	52	394.8	114.1
Con Línea Hércules Dem. 4500 MW									
DAG2	LTG	VOLTAJE DE COLAPSO KV		CARGA MIN. DISPARAR MW		CARGA SUGERIDA DISPA MW		VOLT. DESP DE DISP. CARGA SUGERIDA. KV	
CBD	MW	NIC-400	VDG-115	HYLSA	VDG-115	HYLSA	VDG-115	NIC-400	VDG-115
1 unidad	3000b	384	111.1	60	0	350	0	397	114.4

a CBD+REC 2520 MW Y ALT→GUE 280 MW

b CBD+REC 2520 MW Y ALT→GUE 480 MW

NOTA : La carga mínima a disparar solo evita el colapso de voltaje, las cargas sugeridas evitan tener reserva reactiva en el nodo de NIC-400 menor a 100 MVARs

TABLA 5. Esquema de desconexión de carga por bajo voltaje en la zona metropolitana con demanda de 4687 MW para DAG2

7.3.4. CONCLUSIONES

Al tener una condición de Demanda Máxima y tener 8 unidades conectadas entre REC y CBD, y un flujo de 480 MW, de ALT-GUE y al presentarse la doble contingencia en el tramo CBD-LA, LAM-ESC, se deberá además de desconectar una unidad de CBD. Desconectarse la carga de HYLSA de 350 MW y si fuese necesario (si el voltaje permanece debajo de 358 KV en la subestación San Nicolás) una carga de 50 MW en Villa de García adicionalmente.

7.4. RESUMEN.

En el presente capítulo, se realizaron estudios que se aplican en la actualidad y nos ayudan a establecer los límites operativos que deben respetar los operadores del Sistema eléctrico de Potencia para evitar aproximarse a una inestabilidad de voltaje, también se establecen los valores de disparos de carga que se deben realizar después de ocurrir una contingencia en la red analizada, en este caso en la red de 400 KV. Estos estudios ayudan a los operadores para tener un enfoque de la condición de operación que se tiene en ese momento y poder tomar las medidas necesarias para alejarse de esa condición de operación crítica y poder evitar un colapso de voltaje, al tener posteriormente una contingencia que te arrastre a una inestabilidad en el voltaje, también este tipo de estudios mantiene a los operadores del sistema de Potencia actualizados en el cambio de la topología de la red y de la entrada de unidades generadoras nuevas y de las consecuencias que se pueden presentar al tener una mayor cargabilidad en las líneas y de los efectos que se pueden presentar al tener diversas contingencias.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. INTRODUCCIÓN.

Un objetivo de este trabajo fue determinar las características principales que se presentan para poder identificar cuando un Sistema Eléctrico de Potencia está operando en un nivel crítico, lo cual lo puede llevar a un colapso de voltaje, también se muestran las conclusiones más importantes obtenidas a lo largo del desarrollo del presente trabajo de investigación, así como algunas recomendaciones para trabajos futuros, que pueden realizarse a partir del mismo.

8.2. CONCLUSIONES.

Del presente trabajo de investigación se puede obtener las siguientes conclusiones:

- El problema de control de voltaje que se asociaba solamente a un sistema eléctrico de potencia longitudinal, últimamente ha captado especial atención dentro de problemas a resolver, en la planeación, operación y el control de todos los sistemas eléctricos del mundo, la tendencia apunta hacia el

crecimiento, tanto en sus características topológicas como en sus niveles de carga.

- La necesidad del diseño, y de técnicas de análisis, así como de herramientas de simulación que ayuden a tener un mayor entendimiento de la estabilidad de voltaje es una realidad, que crece en forma paralela con los requerimientos de nuevas estrategias operativas que demandan los Sistemas Eléctricos de Potencia de hoy en día. Tal es el caso del Sistema Eléctrico Nacional, el cual enfrenta cambios cruciales en su operación y control diario, así como por las condiciones planteadas en las nuevas políticas de privatización para la industria eléctrica que rigen en el país.

- Con lo mencionado anteriormente en este trabajo se logró plantear en detalle, el problema de la estabilidad de voltaje en los Sistemas Eléctricos de Potencia, presentando las definiciones de los conceptos más importantes relacionados con el tópico, así como la forma en que se utilizó la herramienta más utilizada en la actualidad para el estudio de Sistemas de Potencia.

- Dentro del conjunto de metodologías existentes para el análisis del problema, se encontró que el uso del Simulador Interactivo de sistemas de Potencia (SISP). Y tomando en cuenta la experiencia de los operadores del Sistema Eléctrico Nacional, se logró la construcción y la aplicación de estrategias operativas que nos ayudan a valorar la proximidad a la inestabilidad de voltaje para un Sistema Eléctrico dado y los mecanismos que explican la aparición de este fenómeno.

- De lo revisado en la literatura técnica, respecto a la conceptualización, la formulación y las ventajas que presenta la metodología que se utilizó en este trabajo se encontró que las características gráficas P-V, Q-V, poseen una buena cantidad de información de aplicación directa, la cual es de mucha

utilidad en el análisis de las condiciones de estabilidad de voltaje que rigen a un sistema en una condición de operación determinada.

- En este trabajo se logró el desarrollo de estrategias operativas aplicables en la actualidad apoyándose en las características gráficas P-V, Q-V, las cuales nos brindan información para poder determinar los límites máximos permitidos ante una condición de operación, en los casos analizados nos ayudan a conocer las condiciones de operación críticas de las cuales debemos alejarnos para evitar tener una contingencia posterior la cual nos lleve a una inestabilidad de voltaje lo que puede producir en un caso más grave un colapso de voltaje.

- En el presente trabajo de investigación se realizaron estudios del Sistema Eléctrico de Potencia Nacional en los cuales se analizaron condiciones de operación en demanda máxima del Área Noreste, se utilizó el Simulador Interactivo de Sistemas de Potencia, como la principal herramienta para obtener estrategias operativas actuales, apoyándonos en las curvas P-V, Q-V. Se establecieron límites máximos y mínimos de operación en los casos analizados, también se estableció un esquema de desconexión de carga por bajo voltaje en la zona metropolitana, en el cual se describe la carga a tirar según las condiciones de operación en ese momento.

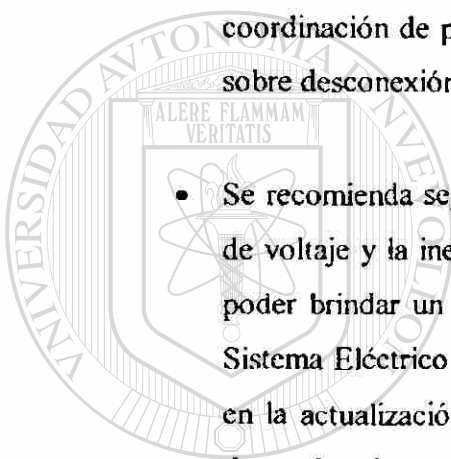
- El objetivo fundamental de este trabajo de investigación es proporcionar a los Operadores del Sistema Eléctrico de Potencia, estrategias operativas para que puedan contar con una defensa, ante contingencias que se presenten en la Red principal y poder evitar tener condiciones de operación más riesgosas, éstos estudios también ayudan a los operadores a mantenerse actualizados en los estudios realizados del Sistema de Potencia ya que la demanda de energía y la topología de la red crece día con día.

8.3. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.

Durante el desarrollo de la investigación se encontraron grandes posibilidades de una mayor aplicación del Simulador Interactivo de sistemas de Potencia, así como de las características gráficas P-V, Q-V Como herramienta de análisis en el problema de estabilidad de voltaje. Tomando como base este trabajo, se recomienda lo siguiente:

- La herramienta utilizada para la obtención de los límites operativos y curvas P-V, Q-V. En el Simulador Interactivo de Sistemas de Potencia, el grado de flexibilidad para su uso es aceptable, sin embargo se debe trabajar más para mejorarlo ampliamente y con ello lograr la explotación del mismo, y promover su uso para personas que estén relacionada con la operación del sistema de Potencia, que no forma parte de una departamento de análisis, esto sería de mucha ventaja porque se aprovecharía la experiencia del personal de operación y los estudios, se apegarían más a la realidad y serían mucho más rápidos de analizar y llegar a conclusiones operativas factibles.
- Los resultados obtenidos en las simulaciones son datos que se apegan a la realidad, se presentan en los estudios condiciones de operación críticas y se analizan alternativas de solución para esas condiciones, se deben seguir dedicando esfuerzos para futuras investigaciones del fenómeno de voltaje para poder entenderlo y así poder crear técnicas nuevas en el control de voltaje; Otro aspecto que no se analiza en este trabajo, es la estabilidad del Sistema de Potencia, al sufrir una contingencia y ver el comportamiento de la frecuencia y el impacto en la estabilidad de voltaje.
- El campo de las redes neuronales puede ser muy útil para poder aplicarlas en el análisis de Estabilidad de Sistemas Eléctricos, ya que se encuentran en procesos de investigación como una herramienta que pueda servir para este fin.

- Se recomienda llevar a cabo un análisis unificado de las curvas P-V, Q-V. Para poder determinar la Estabilidad de voltaje en su totalidad, además de que también el campo del Análisis de Estabilidad de voltaje Dinámico, no se ha explotado en su totalidad y puede llegar a ser una herramienta de mucha utilidad en el campo de Análisis de Sistemas de Potencia.
- Desarrollar investigaciones sobre metodología a seguir para prevenir la inestabilidad de voltaje, como la aplicación de dispositivos de compensación de potencia reactiva, voltaje de generación, controles avanzados en coordinación de protecciones y estudios sobre cambiadores de tap y estudios sobre desconexión de carga para prevenir el colapso de voltaje.
- Se recomienda seguir trabajando en estudios donde se analice la inestabilidad de voltaje y la inestabilidad dinámica en sistemas Eléctricos de Potencia para poder brindar un panorama más real del comportamiento y los efectos en el Sistema Eléctrico de Potencia. Se recomienda seguir trabajando año con año en la actualización de las estrategias operativas, debido al crecimiento de la demanda y la topología de la red, que a medida que aumentan estos factores se hace más complicada la operación del Sistema Eléctrico de Potencia.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

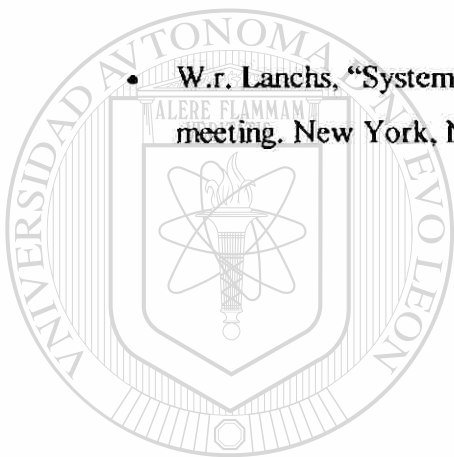


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

BIBLIOGRAFÍA

- Curso. "Control de Voltaje y Potencia Reactiva" Centro Nacional de Control de Energía, Comisión Federal de Electricidad, Puebla, Puebla, Septiembre de 1987.
 - C.W. Taylor, "Power System Voltage Stability, " Mc. Graw-Hill, Inc, 1994
 - F. Aboytes García "Control de Voltaje en sistemas Eléctricos de Potencia". Centro Nacional de Control de energía, Comisión Federal de Electricidad, Monterrey, N.L., Mayo 1991.
 - F. Betancourt Ramírez, F. Aboytes García, "Cargabilidad de Enlaces de Transmisión", Proyecto de Investigación DIE-87-07, Agosto 1987, CFE- UANL.
 - F. Sánchez Tello, R. Ramírez Barradas, " Manual Simulador Interactivo de Sistemas de Potencia," Centro Nacional de Control de Energía, Comisión Federal de Electricidad, Monterrey, N.L. Mayo 1993.
-
- G. Arroyo A. "Operación de Líneas de Transmisión, " Memoria del IEEE, México-79 , págs 112-120. Septiembre de 1979.
 - G. Arroyo A. "Security Assessment in the Operation of Longitudinal Power Systems, " IEEE. Trans. On Power Systems, Vol. PWER-1 No. 2 págs. 225-232, Mayo 1986.
 - IEEE Tutorial Course, " Reactive Power: Basics, Problems and Solutions," Gerald B. Sheble, 1987.
 - P.Kundur, "Power Systems Stability and Control, " Mc. Graw-Hill, Inc. 1994

- R.D. Dunlop, R. Gutman y P.P. Marchenko, "Analytical Development of
- T.J.E. "Reactive Power Control in Electric Systems," John Wiley & Sons, 1982
- W.r. Lanchs, "System Reactive Power Limitations," A-79015-9 IEEE Winter meeting, New York, N:Y:, 1979.
- W.D.Stevenson, "Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia", Mc. Graw-Hill, Inc. 1994.
- W.r. Lanchs, "System Reactive Power Limitations," A-79015-9 IEEE Winter meeting, New York, N:Y:, 1979.



UANL

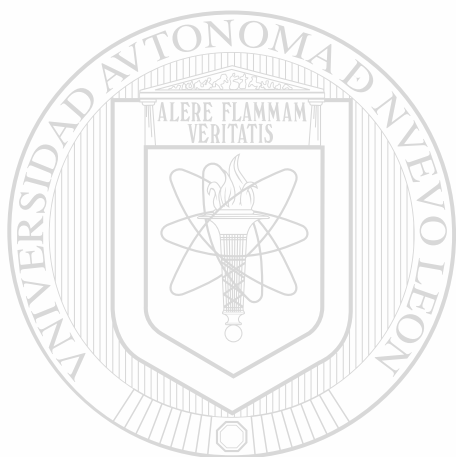
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

LISTADO DE TABLAS**Página**

TABLA 1. Tabla de voltaje en nodos principales en la red de 115 KV	93
TABLA 2. Características de la Generación conectada a la red de 115 KV	94
TABLA 3. Lista de Transformadores y Autotransformadores conectados a la red de 115 KV	97
TABLA 4. Tiro de Carga manual de emergencia	108
TABLA 5. Esquema de desconexión de carga por bajo voltaje en la zona metropolitana con demanda 4687 para DAG2.	111



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

LISTADO DE FIGURAS**Página****CAPITULO 4. CONCEPTOS GENERALES DE CONTROL DE VOLTAJE**

Fig. 4.1. Circuito básico	15
Fig. 4.2. Diagrama fasorial que relaciona el voltaje de generación y el de carga	15
Fig. 4.3. Diagrama fasorial para carga con factor de potencia atrasado	17
Fig. 4.4. Diagrama fasorial para carga reactiva inductiva	19
Fig. 4.5. Control de voltaje local	20
Fig. 4.6. Soporte de voltaje mediante control de voltaje local	21
Fig. 4.7. Cambio en la excitación del generador	22
Fig. 4.8. Sistema elemental para analizar el efecto de cambios en voltaje de generación	23
Fig. 4.9. Diagrama fasorial para analizar el cambio en el voltaje de generación V_i	24
Fig. 4.10 Sistema de potencia elemental	25
Fig. 4.11. Comportamiento del sistema con diferentes voltajes de generación	27
Fig. 4.12 Inyección de Potencia reactiva en nodo de carga	28
Fig. 4.13. Análisis de pérdidas de transmisión	29
Fig. 4.14. Diagrama fasorial para el caso base	30
Fig. 4.15. Efecto del cambio en el voltaje V_i	30
Fig. 4.16. Efecto de la reducción del voltaje V_i	31
Fig. 4.17 Modelo para análisis de cargabilidad en Lt	35
Fig. 4.18 a) Curva de ángulo-potencia	36
b) Conversión del ME a desplazamiento angular	36
Fig. 4.19 Curvas de Cargabilidad	39
Fig. 4.20 Cargabilidad para Lt's de 400 KV en función de la CCC de Envío y Recepción	41
Fig. 4.21. Gráfica de demanda horaria del SIN	43
Fig. 4.22. Potencia reactiva de envío, recepción y total para LT de 230 Kv, 200 Kms	44
Fig. 4.23. Curvas P-Q para LT'S de 400 KV	45

CAPITULO 5.- COLAPSO DE VOLTAJE

Fig. 5.1. Sistema de potencia básico	48
Fig. 5.2. Característica V-P para el sistema básico	49
Fig. 5.3. Cálculo de la proximidad a la inestabilidad de voltaje mediante curvas P-V	56
Fig. 5.4. Cálculo de la proximidad a la inestabilidad de voltaje mediante curvas Q-V	56
Fig. 5.5. Características V-P para diferentes factores de potencia	60
Fig. 5.6. Comparación de características V-P para diferentes tipos de carga	61
Fig. 5.7. Características V-P para diferentes factores de potencia. Carga modelada como impedancia constante	62
Fig. 5.8. Característica Q-V para diferentes niveles de carga activa	63

CAPÍTULO 6. TÉCNICAS DE SOLUCIÓN

Fig. 6.1. Estructura general del simulador interactivo de sistemas de potencia	70
Fig. 6.2. Diagrama esquemático del modelo FLUJOS	72
Fig. 6.3. Diagrama esquemático del modelo FAI LAS	73
Fig. 6.4. Diagrama esquemático de actividades del modelo ESTABI	74
Fig. 6.5. Diagrama esquemático del modelo DINAMI	76
Fig. 6.6. Diagrama esquemático de actividades del modelo PARLIN	77
Fig. 6.7. Secuencia de ejecución del modelo FLUJOS	90
Fig. 6.8. Flujos de Potencia para la zona metropolitana para el caso de demanda máxima	92
Fig. 6.9. Nodo PZA- 115 KV	95
Fig. 6.10. Nodo TEC – 115 KV	96
Fig. 6.11. Flujos de potencia de la zona metropolitana para el caso de demanda máxima	98

CAPÍTULO 7. ALTERNATIVAS Y PROPUESTAS

Fig. 7.1. Flujos esperados para el verano 2000	102
Fig. 7.2. Curvas PV y MVAR'S del CEV en GUE-400	104
Fig. 7.3. Curva PV voltaje en GUE-400 sin CEV con una línea de 400 KV de ALT a GUE fuera	105
Fig. 7.4. Curva PV voltaje en GUE-400 con CEV con una línea de 400 KV de ALT a GUE fuera.	106
Fig. 7.5. Gráfica P-V del comportamiento del enlace de Altamira a Güemez	107

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



GLOSARIO

A

AVR'S Reguladores Automáticos de Voltaje

C

C.A. Corriente Alterna

C.D. Corriente Directa

CDS Control Discreto Suplementario

CEV'S Compensador Estático de Var's

C.F.E. Comisión Federal de Electricidad

Curva P-V Curva que relaciona Potencia Activa y Voltaje

Curva Q-V Curva que relaciona Potencia Reactiva y Voltaje

D

DAG Disparo Automático de Generación

E

EDCBV Esquema de Desconexión de Carga por Bajo Voltaje

EHV Voltaje Extra-Alto

K

KA Kiloamperes

KV Kilovolts

L

LT'S Líneas de Transmisión

M

MVA Megavolts-amperes

MVAR'S Megavars

MW Megawatts

S

SEN	Sistema Eléctrico Nacional
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia
SISP	Simulador Interactivo de Sistemas de Voltaje

SUBESTACIONES

ADC	Arroyo del Coyote	LLN	Llanos
ALT	Altamira	LOL	Loma Larga
AMI	Amistad	MCZ	Moctezuma
ANG	Angostura	MNT	Laminita
APM	Aceros Planos Monterrey	MNZ	Manzanillo
ARV	Arco vial	MON	Monclova
CBD	Carbón Dos	MPS	Montrose
CED	Cedros	MTY	Monterrey
DON	Santo Domingo	NIC	San Nicolás
ESC	Escobedo	NOG	Nogalar
ESP	Esperanza	PBD	Puebla Dos
ETK	Enertek	PEP	Parque Escobedo Provisional
FAN	Falcón	PIT	Pitirero
FRO	Frontera	PRD	Poza Rica Dos
FUN	Fundidora	PZA	Plaza
GLP	Guadalupe	REC	Río Escondido
GÜE	Güemez	RIB	Río Bravo
HAP	Hylsa, Aceros Planos	SAL	Saltillo
HDO	Huinalá Dos	SBM	Sebastián Benito Venegas
HUI	Huinalá	STO	Salto
IMO	Industrias Monterrey	TEC	Tecnológico
JCP	San Jerónimo Potencia	TUL	Tula
JER	San Jerónimo	TMD	Temascal Dos
JIM	Jiménez	UNI	Universidad
LAM	Lampazos	VDG	Villa de García
LAU	Lauro Villar	ZPL	Zapalinamé
LEO	Leona		

U

ULTC	Cambiador de Tap Bajo Carga
------	-----------------------------

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Nombre:	Pavel Valero Esparza
Nombre de los Padres:	José Ignacio Valero Durán Francisca Esparza Arias
Lugar y fecha de nacimiento:	Monterrey, Nuevo León 28 de Agosto de 1971
Grado de Escolaridad:	Ingeniero Mecánico Electricista Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Universidad Autónoma de Nuevo León
Laboral:	Comisión Federal de Electricidad Ingeniero Operador de Área de Control Noreste 1994 a la fecha
Grado que desea obtener:	Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con Especialidad en Potencia
Nombre de la Tesis:	Comportamiento en Sistemas de Potencia ante Colapso de Voltaje

