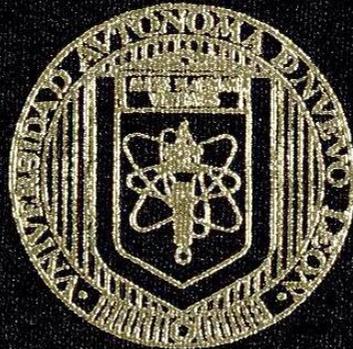


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



“COMPORTAMIENTO EN SISTEMAS DE POTENCIA
ANTE COLAPSO DE VOLTAJE”

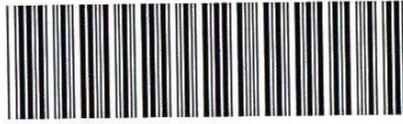
POR

ING. PAVEL VALERO ESPARZA

TESIS

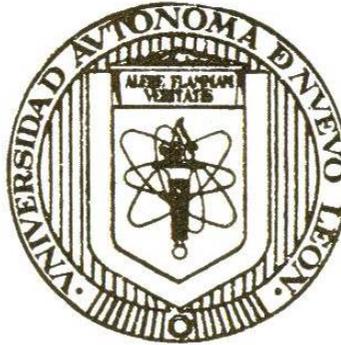
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LA INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD
EN POTENCIA

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



1020145449

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

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”

P O R

ING. PAVEL VALERO ESPARZA

T E S I S

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



FONDO
TESIS

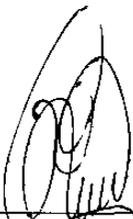
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

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.

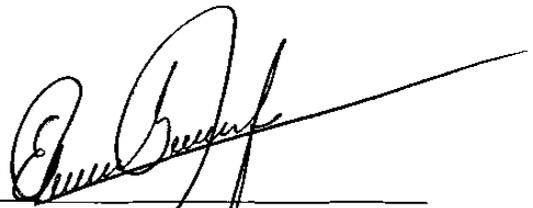
El Comité de Tesis



Dr. Fernando Manuel Betancourt Ramírez
Asesor



M.C. Félix González Estrada
Coasesor



M.C. Evelio P. González Flores
Coasesor



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.

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.

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.

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

7.1. 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

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.

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.

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

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 u 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

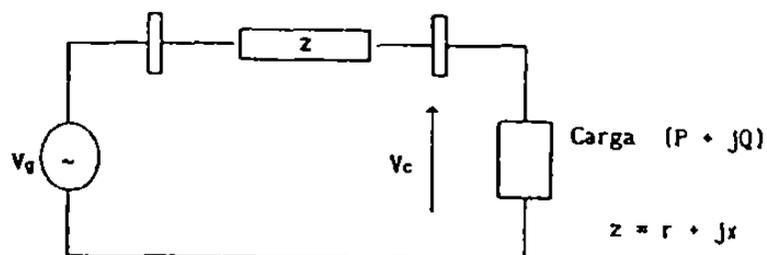


Fig. 4.1 Circuito básico

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

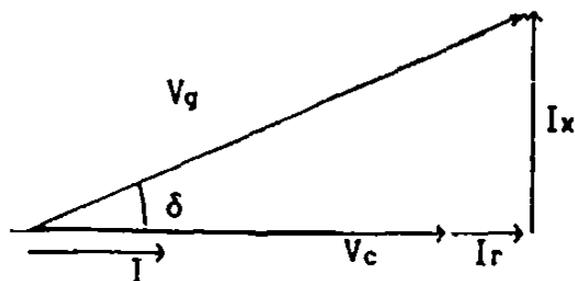


Figura 4.2.

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

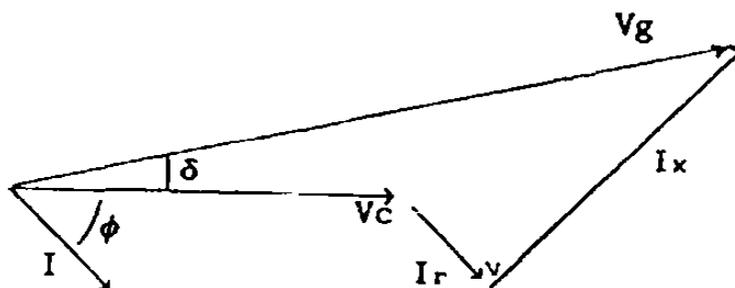


Figura 4.3. Diagrama fasorial para carga con factor de potencia atrasado

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:

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

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 .

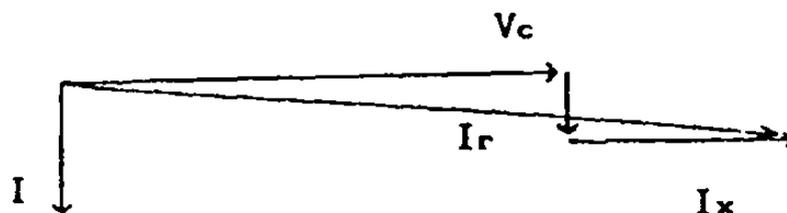


Fig. 4.4. Diagrama fasorial para carga reactiva inductiva

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

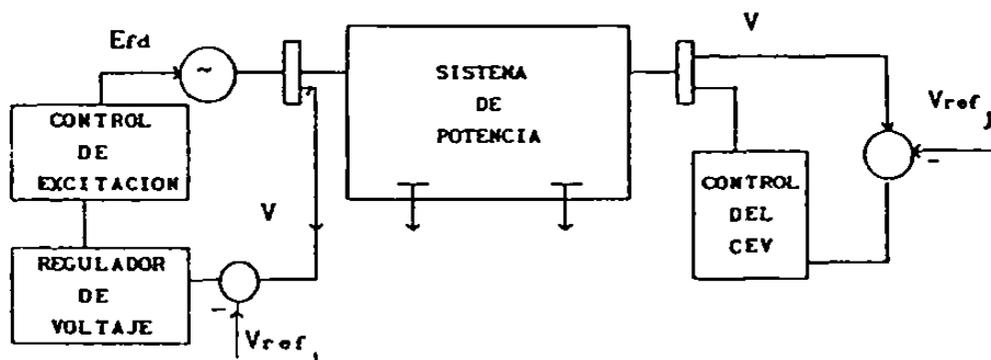


Fig. 4.5. Control de voltaje local

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.

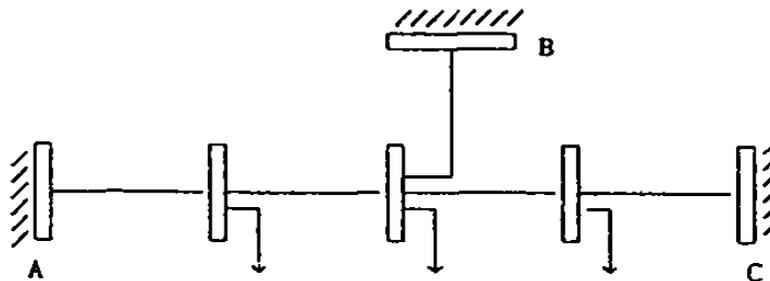


Fig. 4.6. Soporte de voltaje mediante control de voltaje local

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

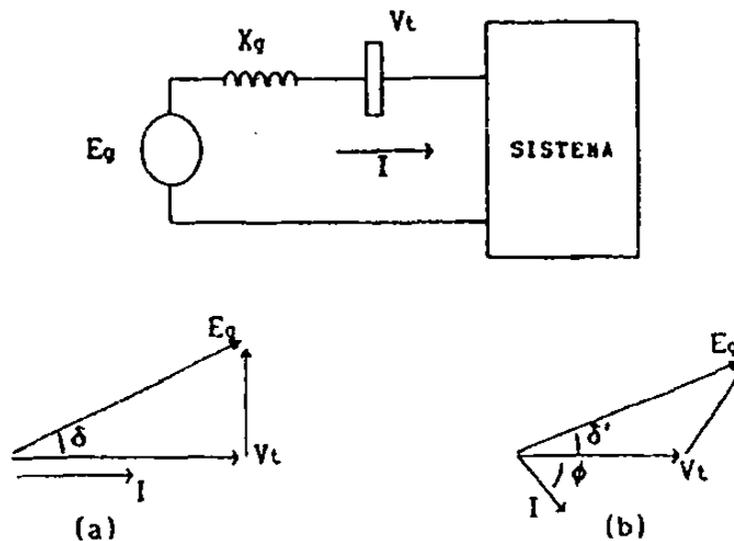


Fig. 4.7 Cambio en la excitación el Generador

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 Eg.) 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). Es 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.

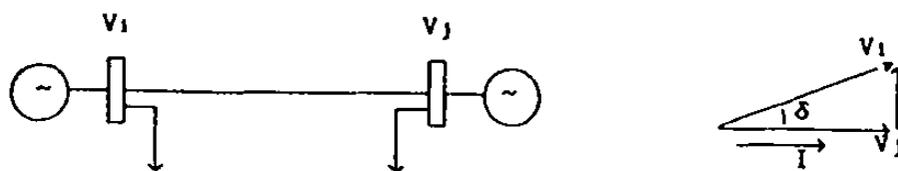


Fig. 4.8. Sistema elemental para analiza el efecto de cambios en voltaje de generación

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).

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

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

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.

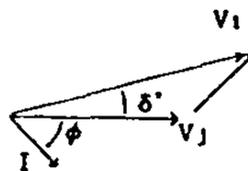


Fig. 4.9. Diagrama fasorial para analizar el cambio en el voltaje de generación V_1

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.

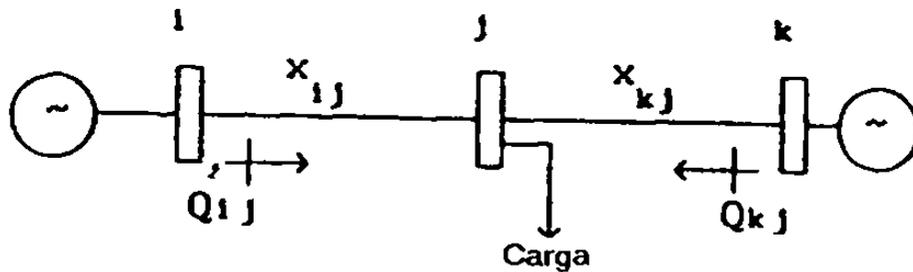


Fig. 4.10. Sistema de potencia elemental

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.

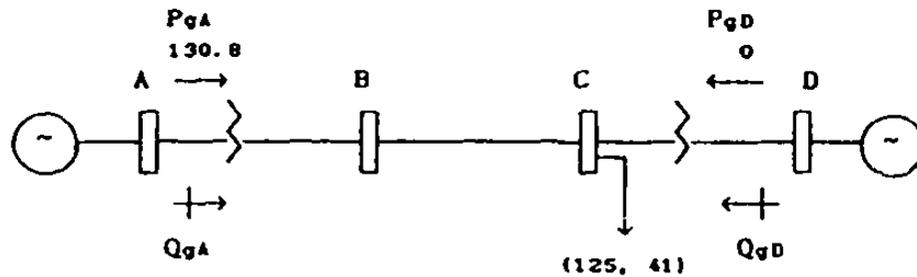
$$\Delta V = \frac{Q_{ij}X_{ij}}{V_i} = \frac{Q_{kj}X_{kj}}{V_k} \quad (4.17)$$

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.

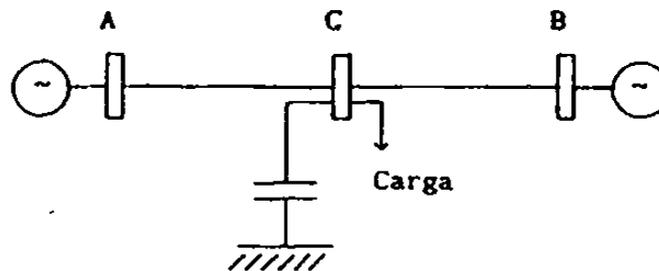


Fig. 4.12 Inyección de Potencia reactiva en nodo de carga

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

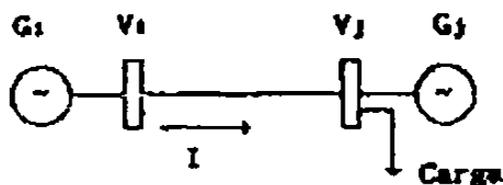


Fig. 4.13 Análisis de pérdidas de transmisión

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

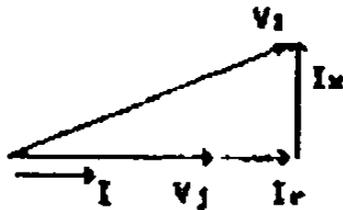


Fig. 4.14. Diagrama fasorial para el caso base

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.

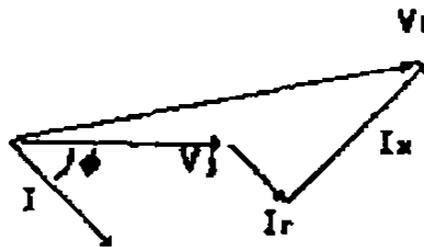


Fig 4.15 Efecto del cambio en el voltaje V_i

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.

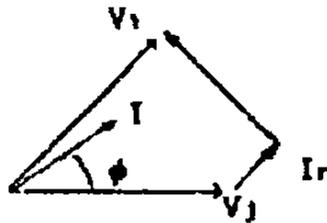


Fig. 4.16. Efecto de la reducción del voltaje V_i

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;

$$V_i - V_j \cos \delta_{ij}$$

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.

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..

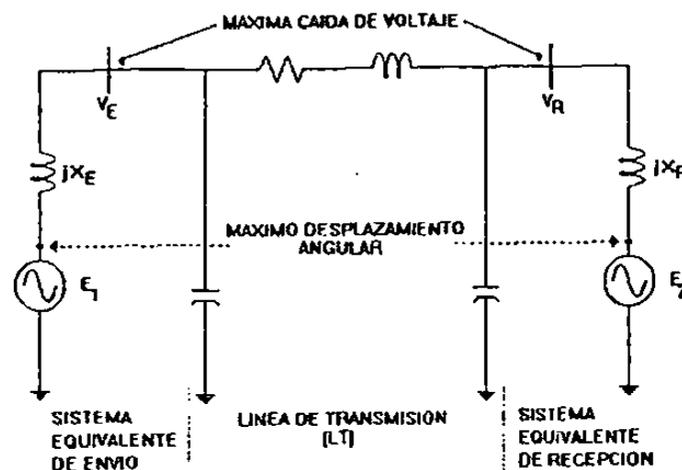


Fig. 4.17. Modelo para análisis de cargabilidad en Lt.

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} .

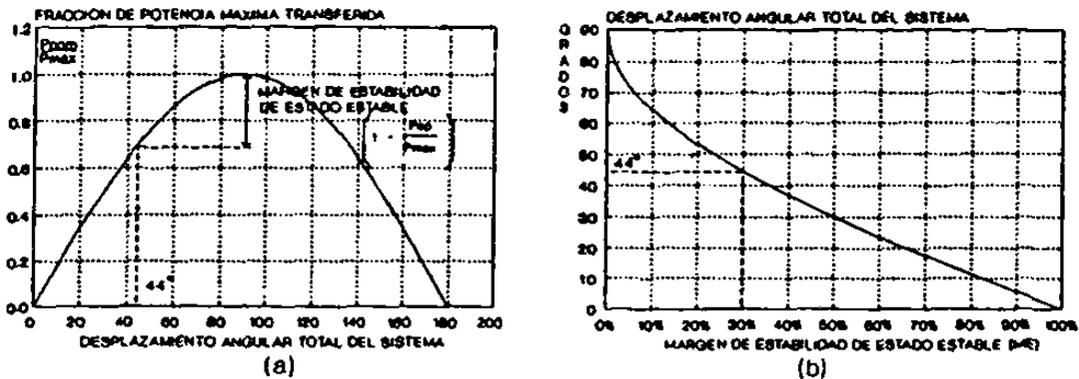


Fig. 4.18 a) Curva del ángulo-potencia

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): Esta valor es un número real definido como:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{Donde: } L = \text{Inductancia de la LT por unidad de longitud}$$

$$C = \text{Capacitancia de la LT por unidad de longitud}$$

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:

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

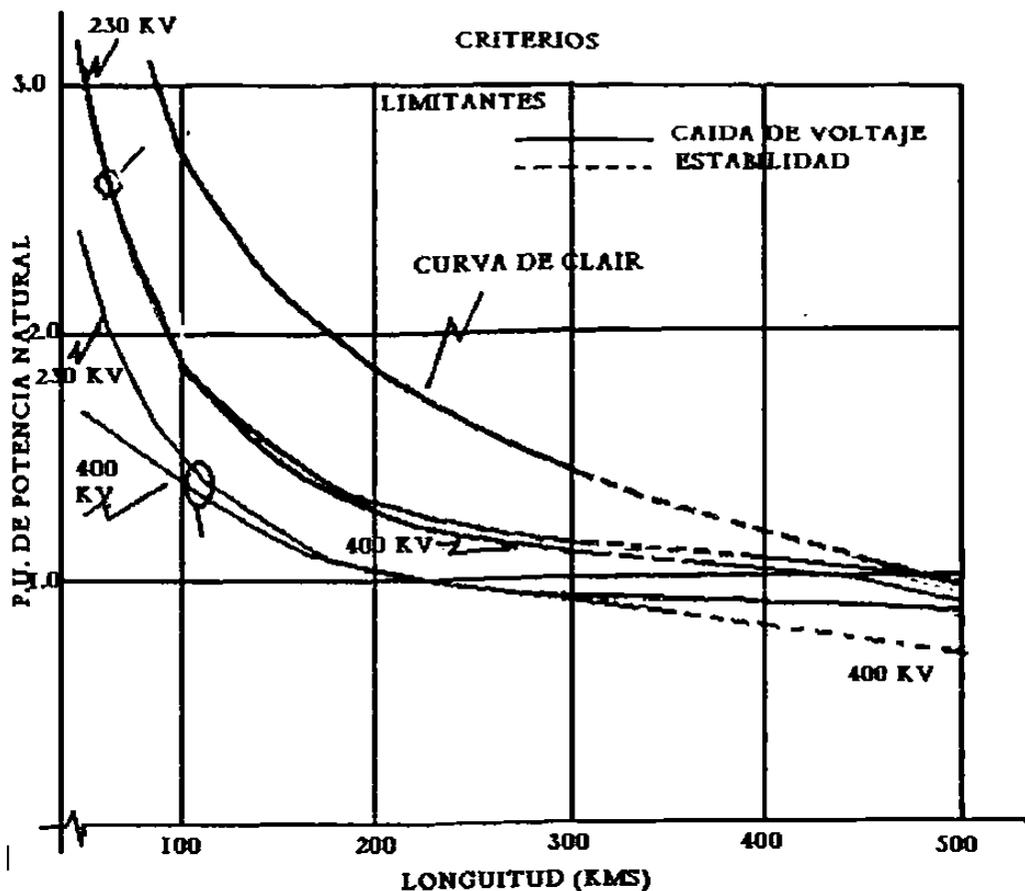


Fig . 4.19 Curvas de Cargabilidad

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.

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

CAPACIDADES DE CORTO CIRCUITO DEL TRONCAL DEL SIN

SUBESTACIÓN	CCC(MVA)	SUBESTACION	CCC(MVA)
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 L^TS 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.

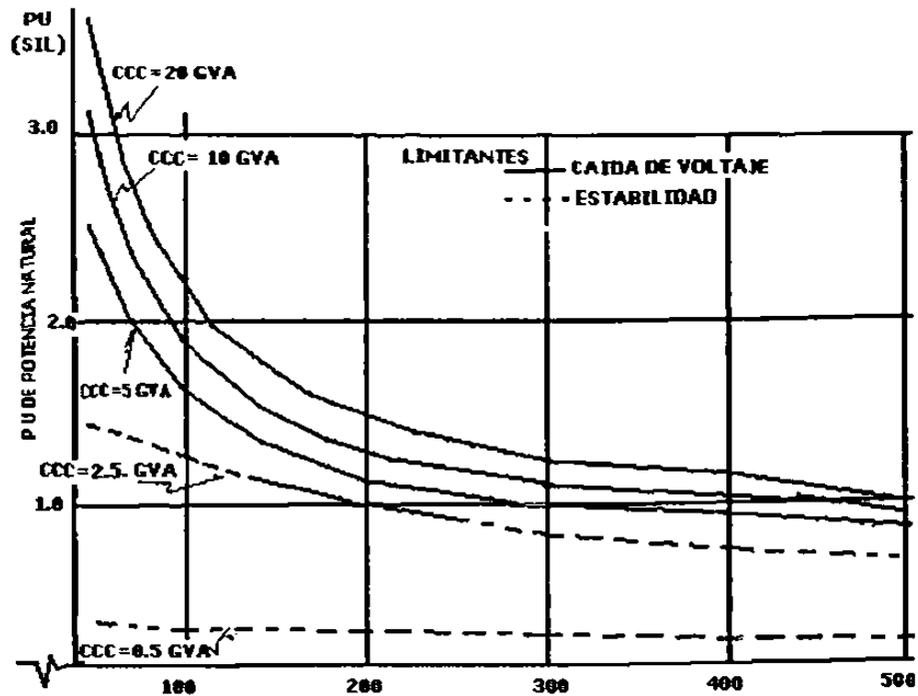


Fig. 4.20 Cargabilidad para LT's de 400 KV en función de la CCC de Envío y Recepción (iguales)

A menudo se tiene LT'S transmitiendo potencia a zonas de carga que carecen de fuentes de reactivos. Se puede mejorar notablemente la utilización de las LT'S (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.

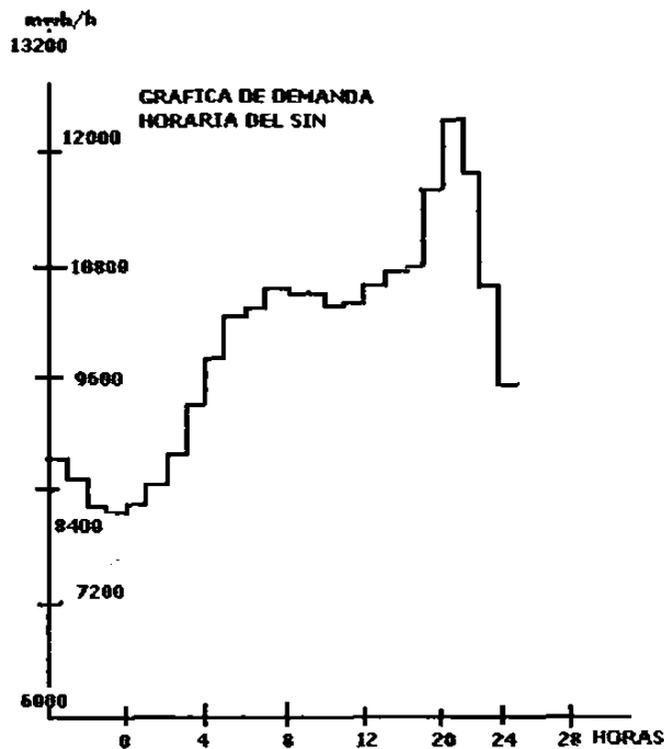


Fig. 4.21. Gráfica de Demanda Horaria del SIN

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.

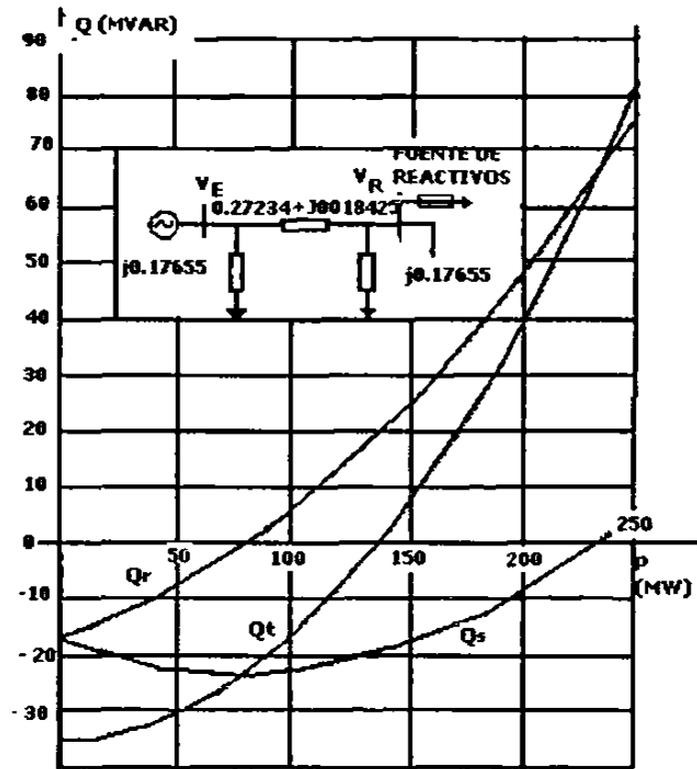


Fig. 4.22 potencia Reactiva de Envío, Recepción y Total para LT de 230 Kv, 200 KMS.

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

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 ($V_E = V_R = 1.0$ PU) en función de la potencia activa transmitida por ella.

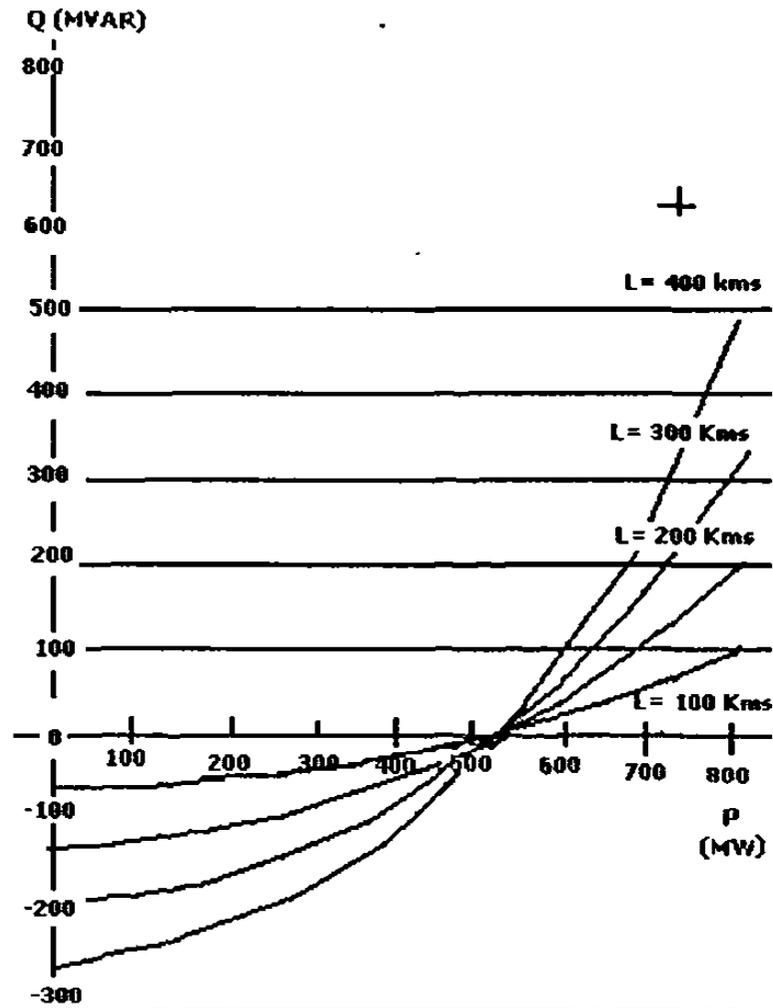


Fig. 4.23. Curvas P-Q para LT'S de 400 KV

En la fig.4.23 se muestra como 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 .

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.