



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE SEP'S ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS CON LÍNEAS DE HVDC.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA

P R E S E N T A:

**CHRISTIAN DANIEL ESPERILLA
VILLANUEVA**



MÉXICO, D. F.

Junio 2008



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 12:00 horas del día 12 del mes de Junio del 2008 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.M.E. ZAC para examinar la tesis de grado titulada:

“ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS CON LÍNEAS DE HVDC ”

Presentada por el alumno:

ESPERILLA

Apellido paterno

VILLANUEVA

materno

CHRISTIAN DANIEL

nombre(s)

Con registro:

B	0	5	1	6	9	8
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

DR. DANIEL OLGUIN SALINAS

Segundo Vocal

DR. DANIEL RUIZ VEGA

Secretario

DR. RICARDO OCTAVIO ARTURO MOTA PALOMINO

Presidente

DR. DAVID ROMERO ROMERO

Tercer Vocal

DR. JAIME JOSÉ RODRÍGUEZ RIVAS

Suplente

M. en C. TOMÁS IGNACIO ASIÁIN OLIVARES

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JAIME ROBLES GARCÍA



SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO**

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D. F., el día 5 del mes junio del año 2008
el(la) que suscribe Esperilla Villanueva Christian Daniel alumno (a) del Programa de
Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica
con número de registro B051698 adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
de la
E.S.I.M.E. Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente Trabajo de Tesis
bajo la dirección del Dr. Daniel Olguín Salinas y cede los derechos del
trabajo intitulado: **ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA
ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS CON LÍNEAS DE HVDC** al
Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines Académicos y de Investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo
sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la
siguiente dirección: esperilla5@hotmail.com

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente
del mismo.

Nombre y Firma

Christian Daniel Esperilla Villanueva

RESUMEN

El estudio de estabilidad angular ante pequeños disturbios es parte del análisis dinámico de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). Una parte fundamental de este estudio, es determinar la influencia que tiene un enlace de alta tensión de corriente directa (HVDC), en oscilaciones electromecánicas entre áreas o grupos de generadores, así como ver el efecto que tiene el enlace de HVDC en nodos de baja robustez. Las líneas de HVDC tienen la habilidad de controlar la magnitud y dirección de potencia transmitida rápidamente. Por lo tanto tiene un impacto importante sobre la estabilidad del SEP.

En esta tesis se presenta el análisis de estabilidad ante pequeños disturbios considerando la influencia de un enlace de HVDC, utilizando como herramienta de solución para la simulación los paquetes computacionales de MATLAB-7 y PSS/E-29 (Power System Simulator of Engineering), empleando diferentes Sistemas de prueba.

En dicho análisis, es considerado un sistema de prueba máquina bus infinito, para el generador síncrono, se utiliza el modelo clásico, transitorio y subtransitorio, también cuenta con un transformador, una línea de transmisión de CA en paralelo con la línea de HVDC, donde la estación convertidora esta conectada al bus infinito.

Para el estudio de un sistema de transmisión interconectado se considera un sistema de potencia caracterizado por dos áreas que contienen, cada una, dos generadores y una carga local, los parámetros de los generadores en las dos áreas son iguales, se observa el comportamiento de las oscilaciones locales e interárea al aplicar una pequeña perturbación a los generadores y se efectúa un análisis modal.

El tipo de carga por otro lado utiliza diferentes modelos. Además, se estudia la estabilidad de un sistema multimáquinas aplicando multilíneas en los nodos más débiles, se determinó la robustez por medio de una relación, la simulación se llevó a cabo con el sistema Nueva Inglaterra de la IEEE por medio del análisis de los modos dominantes.

ABSTRACT

The study of angular stability under small disturbances is part of the dynamic analysis of an Electric Power System. A fundamental part of this study is to determine the influence that a connection of high tension of direct current (HVDC), has in small electromechanical oscillations between areas or groups of generators, therefore the influence that has the connection of HVDC in nodes of low robustness. The HVDC connections have the ability to control the magnitude and direction of quickly transmitted power. Therefore it has an important impact on the stability of the SEP.

In this thesis we present the stability analysis under small disturbances considering the influence of a HVDC connection, using as a tool of solution for the simulation the computational packages of MATLAB and PSS/E (Power Simulator System of Engineering). Using different Systems of test.

For this analysis, the system is considered as a test system machine infinite bus, which the model with classic machine is used, transitory and subtransitory, also it tells on a synchronous generator connected through a transformer and a line of communication of CA an infinite bus, the HVDC connection is connected in parallel, where the investing station is connected to an infinite bus, analyzing the angular stability.

For the study of a system of interconnected transmission a system of power is considered characterized by two areas that contain, each one, two generators and one local load, the parameters of the generators in the two areas are equal, the behavior of the local oscillations is observed and interareas when applying a small disturbance to the generators and takes place a modal analysis.

The type of load in the other hand, is used with different models. In addition, the stability of a multimachines system applying multiconnections in the weakest nodes, the robustness by means of a function was determined; the simulation took to New England system by means of the analysis of the dominant ways.

ÍNDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	Objetivo General	2
1.2.2	Objetivo Particular	2
1.3	JUSTIFICACIÓN	3
1.4	APORTACIONES	3
1.5	ESTADO DEL ARTE	4
1.6	VENTAJAS DE LOS ENLACES DE HVDC	5
1.7	LIMITACIONES Y ALCANCES	6
1.8	ARTÍCULOS PUBLICADOS	7
1.9	ESTRUCTURA DE LA TESIS	8

CAPÍTULO 2

CONCEPTOS FUNDAMENTALES Y CARACTERÍSTICAS DE LÍNEAS DE HVDC

2.1	INTRODUCCIÓN	11
2.2	FUNCIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR DE SEIS PULSOS	11
2.3	FUNCIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR DE DOCE PULSOS	11
2.4	CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA	12
2.5	ANÁLISIS DE CONMUTACIÓN DEL CIRCUITO	14
2.6	OPERACIÓN DEL RECTIFICADOR	16
2.7	OPERACIÓN DEL INVERSOR	19
2.8	CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE HVDC	21
2.8.1	Monopolar	21
2.8.2	Bipolar	22

2.8.3	Homopolar	23
2.8.4	Back-to-Back	23
2.8.5	Sistema multiterminal	24
2.9	COMPONENTES DE UN SISTEMA DE HVDC	26
2.9.1	Estaciones convertidoras	26
2.9.2	Transformador convertidor	27
2.9.3	Reactor serie	27
2.9.4	Filtros de CA y CD	27
2.9.5	Fuentes de potencia reactiva	28
2.10	CONTROL DEL ENLACE DE HVDC	28
2.10.1	Principio básico de control	28
2.10.2	Conceptos básicos para la selección del control	30
2.11	DESCRIPCIÓN DE LOS ESQUEMAS DE CONTROL	31

CAPÍTULO 3

MODELADO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA PARA LA ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS

3.1	INTRODUCCIÓN	34
3.2	MODELO DEL ENLACE DE HVDC	34
3.3	MODELO DEL CABLE DE HVDC	35
3.4	MODELO DEL CONTROL DE HVDC	36
3.5	MODELO SUBTRANSITORIO DEL GENERADOR	37
3.6	MODELO TRANSITORIO DEL GENERADOR	38
3.7	MODELO CLÁSICO	38
3.8	MODELO DE LA RED	39
3.9	MODELO DEL CONTROL DE VOLTAJE Y ESTABILIZADOR	39
3.10	MODELO DEL CONTROL DE VELOCIDAD Y TURBINA	40
3.11	DEFINICIÓN QUE SE DEBEN TOMAR EN CUENTA PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS	41
3.11.1	Definiciones de conceptos relacionados con la estabilidad ante pequeños disturbios	42
3.11.1.1	Estabilidad ante pequeños disturbios	42
3.11.1.2	Estabilidad ante pequeños disturbios	42
3.11.2	Aspectos generales de oscilaciones	42

3.11.2.1	Eigenvalores	44
3.11.2.2	Eigenvectores	45
3.11.3	Linealización	48
3.11.4	Formas modales	50
3.11.5	Factores de participación	51

CAPÍTULO 4

APLICACIONES A SISTEMAS DE PRUEBAS

4.1	INTRODUCCIÓN	53
4.2	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ESTUDIO MÁQUINA BUS INFINITO	53
4.2.1	Caso de estudio	54
4.2.2	Resultados del caso de estudio	55
4.3	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE DOS AREAS	56
4.3.1	Caso de estudio	56
4.3.2	Resultados obtenidos	57
4.3.3	Identificación de modos de oscilación	57
4.4	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA NUEVA INGLATERRA	63
4.4.1	Caso de estudio y resultados obtenidos	63
4.4.2	Resultados del caso de estudio	65

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	CONCLUSIONES GENERALES	67
5.2	CONTRIBUCIONES	69
5.3	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	69
	REFERENCIAS	71

APÉNDICE A

APÉNDICE B

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1	Configuración del puente trifásico (Graetz)	11
Figura 2.2	Rectificador de 12 pulsos	12
Figura 2.3	Forma de onda del convertidor de seis pulsos	13
Figura 2.4	Forma de onda para la operación del rectificador de seis pulsos	14
Figura 2.5	Forma de onda para el proceso de conmutación	15
Figura 2.6	Forma de onda de la operación del inversor	19
Figura 2.7	Enlace monopolar retorno por tierra	21
Figura 2.8	Enlace bipolar	22
Figura 2.9	Enlace homopolar	23
Figura 2.10	Enlace back-to-back	23
Figura 2.11	Componentes de un sistema de HVDC (sistema de cuatro terminales)	25
Figura 2.12	Trasmisión de una línea de HVDC	29
Figura 2.13	Características ideales de estado estable V-I	32
Figura 2.14	Características de estado estable del rectificador e inversor	33

CAPÍTULO 3

Figura 3.1	Diagrama unifilar del enlace de HVDC	35
Figura 3.2	Diagrama unifilar del cable de HVDC	35
Figura 3.3	Diagrama de control del rectificador	36
Figura 3.4	Diagrama de control del inversor	36
Figura 3.5	Control de voltaje de la maquina sincronía	39
Figura 3.6	Control del gobernador con turbina	40
Figura 3.7	Clasificación de la estabilidad de sistemas eléctricos de potencia	41

CAPÍTULO 4

Figura 4.1	Diagrama unifilar del sistema máquina bus infinito	55
Figura 4.2	Diagrama unifilar del sistema de dos áreas	57
Figura 4.3	Comportamiento modal en función de los eigenvectores derechos	59
Figura 4.4	Comportamiento modal en función de los factores de participación	60
Figura 4.5	Flujo de potencia reactiva del rectificador (método secuencial)	60
Figura 4.6	Cambio en la velocidad del generador local	61
Figura 4.7	Cambio en la velocidad del generador interárea	61
Figura 4.8	Cambio en la velocidad del generador local	61
Figura 4.9	Cambio en la velocidad del generador local	61
Figura 4.10	Cambio en la magnitud de voltaje de los nodos de enlace	62
Figura 4.11	Cambio en la magnitud de voltaje de los nodos de enlace	62
Figura 4.12	Diagrama unifilar del sistema Nueva Inglaterra	65

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1	Influencia del enlace de HVDC en la estabilidad ante pequeños disturbios considerando los modelos del generador clásico, transitorio y subtransitorio, sin controles en las maquinas.	55
Tabla 4.2	Influencia del enlace de HVDC en la estabilidad ante pequeños disturbios considerando los modelos del generador clásico y subtransitorio.	57
Tabla 4.3	Influencia de la robustez del un sistema de CA en los sistemas de CA/CD	58
Tabla 4.4	Influencia del enlace de HVDC en los eigenvalores, razón de amortiguamiento y frecuencia de oscilación en los generadores modelo clásico considerando enlace multiterminal.	64

GLOSARIO

HVDC	Alta tensión de corriente directa
CD	Corriente directa
CA	Corriente alterna
N	Número de puentes del convertidor
I_d	Corriente directa de la línea
SEP	Sistema eléctrico de potencia
Graetz	Configuración del puente trifásico
P_R	Potencia activa en el lado del rectificador
P_I	Potencia activa en el lado del inversor
Q_R	Potencia reactiva en el lado del rectificador
Q_I	Potencia reactiva en el lado del inversor
a_r	Cambiador de tap del rectificador
a_i	Cambiador de tap del inversor
P	Potencia activa
L_c	Inductancia de conmutación
Q	Potencia reactiva
MVARs	Mega Volts Amperes Reactivos
Taps	Cambiador en derivación
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
V_{co}	Máximo voltaje CD promedio (no hay carga en el disparo del ángulo)
V_d	Voltaje de CD del convertidor
V_{an}	Voltaje de la línea a neutro de la fase a
V_{bn}	Voltaje de la línea a neutro de la fase b
V_{cn}	Voltaje de la línea a neutro de la fase c
$V_{dor} \cos \alpha$	Voltaje de CD del rectificador debido al ángulo de disparo
$V_{doi} \cos \gamma$	Voltaje de CD del inversor debido al ángulo de disparo
R_d	Resistencia del puente convertidor
R_{cr}	Resistencia del puente rectificador
R_{ci}	Resistencia del puente inversor
S_{dr}	Potencia compleja en las terminales de CD del rectificador

S_{di}	Potencia compleja en las terminales de CD del inversor
V_{term}	Voltaje en terminales del convertidor CA
P_d	Potencia activa de CD
R_l	Resistencia de línea de CD
l_l	Inductancia de línea CD
Np_r	Número de puentes en el rectificador
Np_i	Número de puentes en el inversor
α_r	Angulo de disparo del rectificador
γ_i	Angulo de disparo del inversor
X_C	Reactancia de conmutación del convertidor
X_{Cr}	Reactancia de conmutación en el rectificador
X_{Ci}	Reactancia de conmutación en el inversor
Δx	Vector de estado de dimensión n
A	Parte lineal de las ecuaciones de estado
B	Matriz de control o de entrada de dimensión n x r
λ	i-ésimo eigenvalor
ϕ_{ki}	K-ésima entrada del eigenvector derecho ϕ_{ki}
ψ_{ki}	K-ésima entrada del eigenvector izquierdo ψ_{ki}
P_{ki}	Factor de participación relacionada con la k-ésima variable de estado al i-ésimo eigenvalor
δ	Ángulo de carga eléctrico del rotor
ω	Velocidad angular eléctrica del rotor
ω_0	Velocidad inicial
H	Constante de inercia
K_D	Coefficiente de amortiguamiento
X_d	Reactancia del eje directo
X_q	Reactancia propia del devanado en el eje en cuadratura
E'_q	Voltaje proporcional a los enlaces de flujo del devanado de campo
$-E'_d$	Voltaje proporcional a los enlaces de flujo del devanado de amortiguamiento en el eje q, kq1
E''_{qi}	Voltaje proporcional a los enlaces de flujo del devanado de amortiguamiento en el eje d, kd.
$-E''_d$	Voltaje proporcional a los enlaces de flujo del devanado de amortiguamiento en el

	eje q, kq2
x'_d	Reactancia transitoria en el eje directo
x''_d	Reactancia subtransitoria en el eje directo
T'_{d0}	Constante de tiempo transitoria de circuito abierto
T''_{d0}	Constante de tiempo subtransitoria de circuito abierto
x'_q	Reactancia transitoria en el eje directo
x''_q	Reactancia subtransitoria en el eje directo
T'_{q0}	Constante de tiempo transitoria de circuito abierto
T''_{q0}	Constante de tiempo subtransitoria de circuito abierto
V_{dor}	Voltaje de cd en el rectificador
V_{doi}	Voltaje del puente inversor
i_{cc}	Corriente en derivación
i_{dc_ord}	Corriente de referencia
i_{dr}	Corriente del rectificador
V_{doi}	Voltaje del puente inversor
i_{dr_mod}	Corriente de modulación

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO

1

1.1 INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se estudia la estabilidad angular ante pequeños disturbios considerando la influencia de un enlace de HVDC, el cual tiene un impacto importante en cuanto a la estabilidad de los sistemas. Uno de los grandes problemas dinámicos que se tiene en los SEP's, es la inestabilidad que éste tipo de sistemas pueden llegar a tener, debido a la producción de oscilaciones electromecánicas con baja frecuencia, provocadas por pequeñas perturbaciones, siendo causadas por cambios normales en la operación diaria de las redes eléctricas, que a su vez, producen desbalances en la potencia mecánica y eléctrica; principalmente en los rotores de las máquinas síncronas, al oscilar en forma relativa unas con otras [1, 2, 34]

La primer línea de HVDC se realizó en el año 1954, por lo que se puede considerar a los enlaces de (CD) como una tecnología consolidada, aunque en continua evolución tanto por la electrónica de potencia como por las mejoras tecnológicas de los cables. Una de las principales características de los enlaces de **HVDC** es que tienen la habilidad de controlar la potencia transmitida rápidamente, por lo tanto tiene una influencia sobre las redes de CA asociadas [1, 4, 5, 37].

En diferentes partes del mundo se han dado a la tarea de realizar diversos estudios para incorporar el modelo de enlaces de **HVDC** en la transmisión de los sistemas eléctricos de potencia [3]. En nuestro país se han estudiado proyectos para aumentar la capacidad de transmisión con los países vecinos. Uno de los proyectos es el análisis para definir

interconexiones en base a su tamaño y características físicas para el proceso de planificación, las cuales permiten el acceso a otros mercados competitivos para la compra o venta de la electricidad [3].

En el presente trabajo se estudian las oscilaciones electromecánicas, las cuales son usualmente clasificadas en dos categorías: modo Inter-área y modo locales [17], considerando la influencia de un enlace de HVDC así como los diferentes modelos de carga.

La solución generalmente utilizada para amortiguar las oscilaciones en los sistemas de potencia es la instalación de un estabilizador de potencia por sus siglas en inglés (PSS) en conjunto con el regulador automático de voltaje (RAV) del generador, y el gobernador turbina (G/T).

Las condiciones iniciales para el análisis de estabilidad angular ante pequeños disturbios se obtienen de un estudio de flujos de potencia basado en el método iterativo Newton Raphson y como herramienta para solución del enlace de HVCD se utiliza el método secuencial [31, 33]

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Implementar y mejorar un programa en MATLAB-7 para realizar estudios de estabilidad de un SEP ante pequeños disturbios considerando el impacto de un enlace de HVDC.

1.2.2 Objetivo particular

Entender el modelo de los enlaces e implementarlo en el programa para estudiar el comportamiento que tiene la línea de HVDC ante pequeños disturbios en el sistema máquina bus infinito, con diferentes modelos de máquina síncrona. Analizar las oscilaciones locales e interárea, de sistemas multimáquinas, al aplicar una pequeña perturbación a los generadores y

también efectuar un análisis modal, para ver la influencia que tiene los modelos de carga y como en los SEP's con HVDC.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Debido al crecimiento de los SEP's en todo el mundo, así como la necesidad de interconectarse entre diferentes países, pocos sistemas eléctricos de potencia escapan al efecto de la tecnología de **HVDC** tanto en la planeación como en la operación del sistema. Tal es el caso de la red interconectada de México [3]. Nuestro interés en los sistemas de **HVDC** se debe a sus múltiples ventajas, una de ellas es que los sistemas de **HVDC** tienen la habilidad de controlar la potencia transmitida rápidamente, por lo tanto, tienen un impacto importante sobre el funcionamiento y la estabilidad de las redes de energía de CA asociadas. Tales expansiones han forzado al desarrollo de modelos analíticos para representar el comportamiento de los sistemas de potencia de CA-CD tanto en estado estacionario como en estado dinámico.

1.4 APORTACIONES

- Se implementó un programa computacional en MATLAB que realiza estabilidad angular ante pequeños disturbios.
- Se utilizó el software PSS/E para la simulación de estabilidad ante pequeños disturbios considerando la influencia del enlace de HVDC.
- Sirviendo también para comprobar los resultados obtenidos con el programa implementado en MATLAB.
- Se analizo el efecto del modelo de carga en SEP's CA-CD.

1.5 ESTADO DEL ARTE

El primer uso comercial aplicado de HVDC se dió entre Suecia continental y la isla de Gotland en el Mar Báltico en el año 1954. Era una técnica prácticamente desconocida en cualquier parte del mundo, el enlace fue submarino, utilizó válvulas de arco de mercurio con una distancia del enlace de 90Km con una capacidad de 20MW; desde entonces ha habido un aumento constante de la transmisión de alto voltaje de corriente directa, así como día a día se han ido descubriendo sus grandes ventajas [1, 4,, 5, 6].

Con la innovación de los convertidores de válvulas de tiristores, la transmisión de HVDC llegó a ser mucho más atractiva. El primer sistema de transmisión que utilizó esta técnica se dió en el año de 1972, fué un sistema el cual utilizó la técnica back-to-back con una capacidad de 320MW, interconectando la provincia canadiense de Nuevo Brunswick y Québec[4, 7].

En diferentes partes del mundo se han realizado estudios de proyectos para incorporar enlaces de HVDC. Uno de los proyectos más recientes fueron realizados por los autores B. Zohouri Zangeneh, A. Shoulaie, en el año 2003, quienes utilizan un simulador con paso de tiempo óptimo por sus siglas en ingles (SOST), los cuales realizaron estudios en estado estacionario y estudios de estabilidad [8, 9].

En México, en 1962 se dieron los primeros intentos por introducir la tecnología de transmisión en HVDC, uno de los pioneros en esta investigación es el Dr. Alfredo Nava Segura [1], su trabajo presenta algunos de los rasgos distintivos de la transmisión de energía eléctrica con corriente continua (CC) y un resumen de los diferentes intentos realizados para introducir la tecnología de transmisión de HVDC en nuestro país. Asimismo, incluye las actividades realizadas tanto en los campos de educación superior como la investigación para fortalecer el conocimiento en ese campo de los Sistemas de Potencia. Por último el autor presenta sus puntos de vista acerca de las perspectivas de utilización de la transmisión de energía eléctrica en nuestro país.

En el año 2002, una investigación más reciente de esta tecnología fue hecha por el Dr. Arturo Román Messina [11], quien en su trabajo presenta la investigación de métodos y técnicas de análisis lineal al estudio de estabilidad angular en sistemas híbridos CA/CD, con un énfasis en el control de oscilaciones electromecánicas entre áreas o grupos de generadores. Otra de las investigaciones más recientes en nuestro país fue realizada por María Concepción Ortiz Villanueva [40], quien en su trabajo describe los diferentes métodos de solución aplicados a flujos de potencia, así como las diferentes configuraciones de un enlace de HVDC. Dicho trabajo fue tomado en cuenta para obtener las condiciones iniciales del sistema y aplicarlo a el estudio de estabilidad ante pequeños disturbios.

1.6 VENTAJAS DE LOS ENLACES DE HVDC

Las interconexiones utilizadas en condiciones de emergencia, son necesarias para prevenir la falta de suministro prolongado ante disturbios que afectan la red o el equipo de transmisión, así como para apoyar el restablecimiento de sistemas en caso de apagones.

La técnica de transmisión de energía en CD ha dado pruebas de ser un medio práctico para transportar grandes cantidades de energía eléctrica a través de distancias de transmisión largas.

En dichos estudios se deben tener en cuenta diversos criterios, a la hora de elegir entre un sistema de corriente CA y un sistema de **HVDC** en la transmisión de energía eléctrica. Como en todo proyecto se realizan estudios de confiabilidad y económicos con la finalidad de ofrecer un mejor servicio, es por eso que presentamos algunos aspectos a tomar en cuenta como son [1, 4]:

- Cuánta potencia se planea transmitir entre los sistemas y en que dirección
- Entre que subestaciones deberán instalarse la interconexión
- Cuáles son los requerimientos de confiabilidad
- La frecuencia de los sistemas es la misma
- Aspectos medioambientales permisos
- Es confiable y económico.

Cuando ya se tomó en cuenta lo anterior, ahora podemos definir que existen dos soluciones completamente diferentes para la interconexión de dos redes de potencia:

- Un enlace síncrono
- Un enlace asíncrono

Un enlace síncrono es la solución natural si las frecuencias de las dos redes a interconectar son las mismas; si no fuera así, la solución natural es un enlace asíncrono. Aún siendo las frecuencias de las dos redes a interconectar la misma, hay casos donde un enlace en CA no satisface los requerimientos impuestos a la interconexión ó es más cara que un enlace en CD [12].

La transición utilizando los enlaces de HVDC presenta múltiples ventajas comparadas con los sistemas de CA.

- Un disturbio en algunas de las redes que afecte la frecuencia no afecta la potencia transmitida
- No hay riesgo de inestabilidad en la interconexión
- Mantiene un control eficiente de flujos de potencia.
- Transmisión aérea a grandes distancias.
- Transmisión submarina
- Transmisión subterránea
- Mantiene niveles relativamente altos de estabilidad en el sistema de c.a.

1.7 LIMITACIONES Y ALCANCES

Limitaciones

- El modelo del enlace de CD con el que se trabajó en esta tesis, no permite utilizar enlaces multiterminales.

- Este programa solo permite trabajar con la configuración del enlace del tipo monopolar.
- En el análisis de este trabajo la compensación de los reactivos en las terminales de CA de la línea solo es del tipo capacitiva

Alcances

- El programa tiene la capacidad de identificar los nodos más débiles de los sistemas eléctricos de potencia para poder aplicar el enlace de HVDC en los nodos de baja robustez.
- El aplicar un pequeño disturbio a las potencias mecánicas de los generadores, nos permite analizar el comportamiento de las oscilaciones locales e interárea en variables de las máquinas como puede ser la velocidad o las magnitudes de voltajes en terminales del enlace de HVDC.
- El programa puede realizar el modelo de carga ZIP, permite trabajar con potencias de carga, corriente de carga e impedancia de carga (activa y reactiva).
- Los resultados obtenidos de los SEP's pudieron ser validados en el paquete comercial PSS/E.

1.8 ARTÍCULOS PUBLICADOS

De este trabajo de tesis se lograron publicar en foros de divulgación nacional, los siguientes trabajos específicos participando como autor:

C. D. Esperilla Villanueva, D. Olguín Salinas, “*Análisis de Estabilidad ante Pequeños Disturbios Considerando la Influencia de un Enlace de CD*”, 1er Foro Institucional de Formación de Investigadores, Centro de Formación e Investigación Educativa del IPN. , México, D. F., 28 al 30 de Agosto, 2006

C. D. Esperilla Villanueva, M. C. Ortiz Villanueva, D. Olguín Salinas, “*Estudio de Flujos de Potencia Incorporando Enlaces de HVDC*”, IEEE, Reunión de Verano de Potencia y Aplicaciones Industriales RVP-AI/2007, Acapulco, Guerrero, México, 8 al 14 de Julio 2007

C. D. Esperilla Villanueva, D. Olgún Salinas, “*Análisis de Estabilidad Angular ante Pequeños Disturbios Considerando la Influencia de un Enlace HVDC en SEP’s*”, IEEE, Reunión de Verano de Potencia y Aplicaciones Industriales RVP-AI/2007, Acapulco, Guerrero, México, México, 8 al 14 de Julio 2007

C. D. Esperilla Villanueva, D. Olgún Salinas, “*La Influencia de un Enlace de HVDC en las Oscilaciones de un Sistema Interconectado de Dos Áreas*”, 10° Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, México, D. F. Noviembre del 2007.

C. D. Esperilla Villanueva, M. C. Ortiz Villanueva, D. Olgún Salinas, “*Análisis de Flujos de Potencia de CA/CD*”, 10° Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, México, D. F. Noviembre del 2007.

C. D. Esperilla Villanueva, D. Olgún Salinas, “*Estabilidad angular ante pequeños disturbios de un SEP con enlace de HVDC*”, IEEE, Reunión de Verano de Potencia y Aplicaciones Industriales RVP-AI/2008, Acapulco, Guerrero, México, México, 6 al 12 de Julio 2008, (*aceptado*)

1.9 ESTRUCTURA DE LA TESIS

En esta sección se da una breve descripción del contenido de cada uno de los capítulos propuestos este trabajo de tesis:

- *En el Capítulo 1.* Se presenta la introducción del problema para incorporar el modelo de un enlace de HVDC en estudios de estabilidad angular ante pequeños disturbios, se muestra el objetivo pretendido. También se exponen los trabajos o publicaciones durante la investigación del trabajo. Así como las diferentes ventajas que se tienen de las líneas de CD sobre las líneas de CA.
- *En el Capítulo 2.* Se presenta los conceptos fundamentales que se deben tener en cuenta para realizar el modelo de la línea de CD.
- *En el Capítulo 3.* Se da un panorama general del modelado de un Sistema Eléctrico de Potencia para estabilidad ante pequeños disturbios

- *En el Capítulo 4.* Se presentan los resultados de las diversas simulaciones hechas con cada uno de los Sistemas Eléctricos de Potencia propuestos con el objeto de presentar de una manera más clara los conceptos y formulaciones presentados en los capítulos anteriores.
- *En el Capítulo 5.* Se establecen las conclusiones generales del trabajo de tesis, así como recomendaciones para trabajos futuros en el tema.
- *Apéndice A.* Relación de corto circuito de un sistema de CA-CD.
- Finalmente, *en el Apéndice B.* Parámetros de los sistemas de prueba.

CONCEPTOS FUNDAMENTALES Y CARACTERÍSTICAS DE LÍNEAS DE HVDC



2.1 INTRODUCCIÓN

Los ingenieros de proyectos de sistemas reconocen que la tecnología de HVDC puede ofrecer hoy en día ventajas técnicas, prácticas y económicas como método de transmisión. La energía eléctrica se transmite desde hace aproximadamente 120 años, y el primer enlace de HVDC se realizó en la isla de Gotland en 1954 con un cable submarino de 20 MW y 100 kV. Esto era tan sólo el principio de una tecnología acertada. Por lo que se puede considerar a la HVDC como una tecnología consolidada, aunque en continua evolución tanto por la electrónica de potencia como por las mejoras tecnológicas de los cables utilizados. La mejor prueba de su madurez son los más de 70.000 MW instalados hasta el año de 2005 en más de 90 proyectos en todo el mundo, así como los numerosos proyectos de HVDC en curso [3, 12].

2.2 FUNCIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR DE SEIS PULSOS.

El puente trifásico de seis pulsos llamado también puente de Graetz, presentando en la Figura 2.1, es la unidad básica para el uso de conversión de energía de CA-CD y de CD-CA. El número (1, 2, 3, 4, 5 y 6) en la Figura 2.1 muestra la secuencia de conducción de las válvulas, con referencia a las secuencias positiva de la fase (a, b y c) del sistema de CA [4, 14, 15].

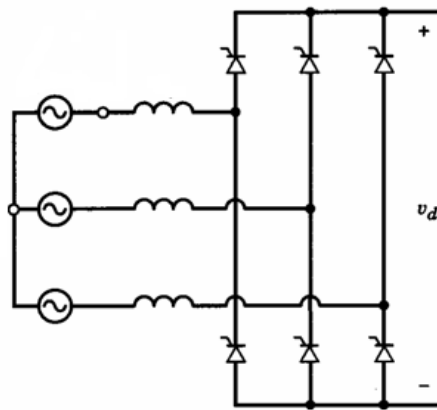


Figura 2.1. Configuración del puente trifásico (Graetz) [14].

Se considera que las válvulas del puente son el corazón del proceso de la conversión de la transmisión de HVDC, sus pérdidas son muy pequeñas. El puente es capaz de invertir el semiciclo negativo (o positivo) de cada fase, la forma de la señal a la salida del puente dependerá del instante en que se disparen las válvulas. Es posible variar el ángulo de disparo desde 0° hasta 180° , lo que permite controlar la potencia a transmitir. Cuando el puente funciona como rectificador el ángulo puede variar de (0° a 90°) y cuando funciona como inversor el ángulo varía de (90° a 180°) [14, 15].

2.3 FUNCIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR DE DOCE PULSOS.

Dos series de puentes conectados constituyen un grupo convertidor de 12 pulsos como se muestra en la Figura 2.2, es la configuración más comúnmente usada en la transmisión de alto voltaje a larga distancia. Cada polo consiste de dos convertidores trifásicos de seis pulsos conectados a través de un transformador, uno por puente. Con el objeto de conseguir una señal con menos rizo posible, se utilizan dos tipos de conexión Y-Y y un transformador Y- Δ [11].

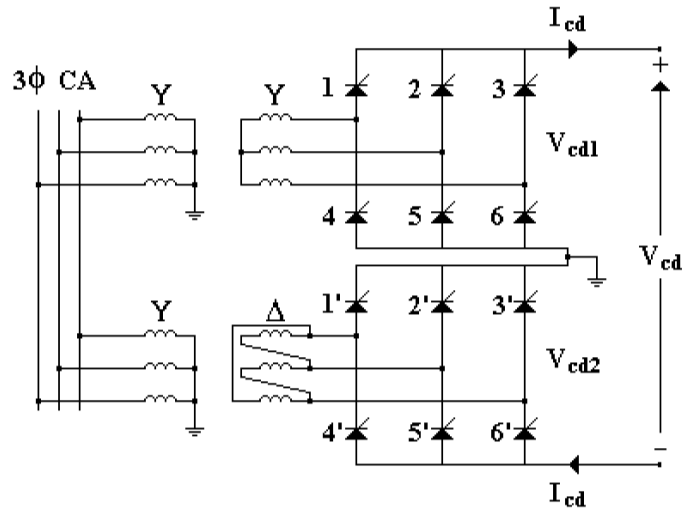


Figura 2.2. Rectificador de 12 pulsos [11].

2.4 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA

Para propósito de análisis de los puentes trifásicos de onda completa haremos las siguientes suposiciones:

- (i) El sistema de CA, incluyendo el transformador del convertidor se puede representar por una fuente ideal de voltaje y de frecuencia constante, en serie con una inductancia con perdidas mínimas, como se muestra en la Figura 2.1 (ésta representa sobre todo la inductancia del transformador) [4, 7, 5].
- (ii) La reactancia de salida del transformador convertidor (en el lado secundario) en las terminales son trifásicas y la variación de la reactancia de salida causada por el cambiador del tap en la carga son ignoradas [4, 7, 5].
- (iii) La corriente directa (I_d) es continua y el rizo es menor que el valor de la corriente nominal debido a la utilización de los reactores en serie. En consecuencia se asume que la corriente es prácticamente constante es decir sin rizo [4, 7, 5, 15].

- (iv) Las válvulas son interruptores ideales con resistencia cero al conducir y resistencia infinita al no conducir [4, 7].
- (v) Las armónicas de corriente en las terminales del convertidor son filtradas hacia fuera, por lo tanto, el voltaje en las terminales del convertidor es perfectamente senoidal.

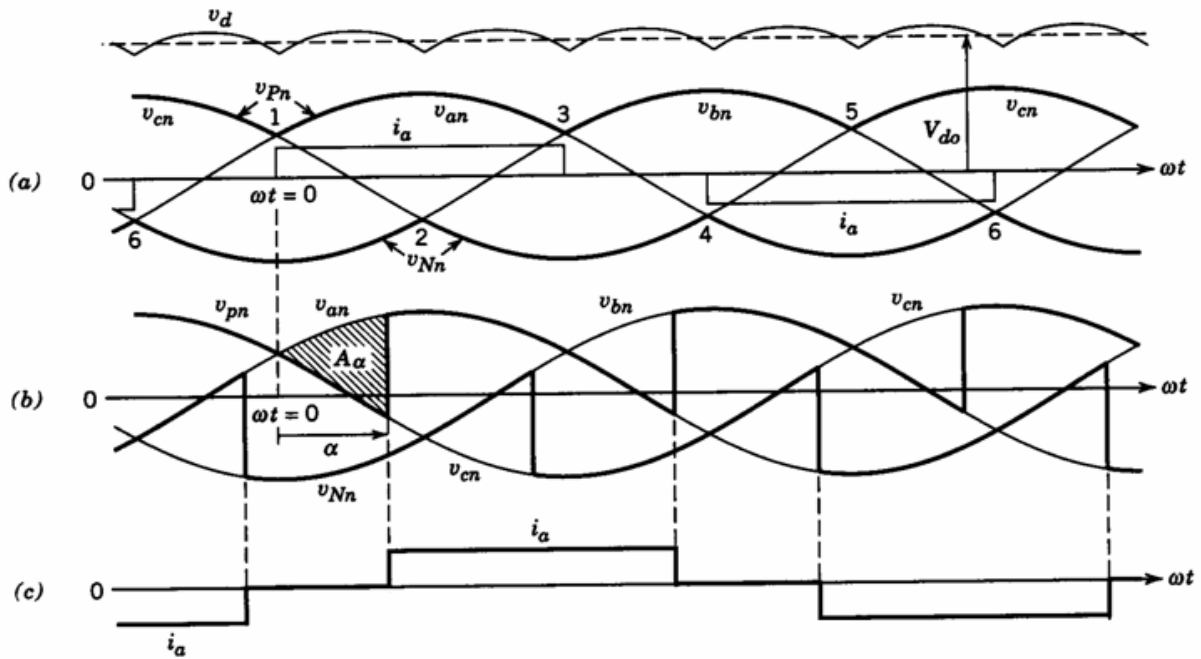


Figura 2.3. Forma de onda del convertidor de seis pulsos [14].

- a) Fuente de voltaje de fase a neutro y la corriente de fase ideal
- b) Forma de onda del efecto del ángulo de disparo α del convertidor
- c) corriente de fase del lado del convertidor con el efecto de ángulo de disparo

Bajo esas suposiciones la Figura 2.3, presenta los voltajes del sistema trifásicos y las corrientes del convertidor del puente rectificador de la Figura 2.1, para la conexión del puente Y- Δ . La corriente en la Figura 2.3a corresponde a la conmutación ideal y la corriente en la Figura 2.3c representa el efecto de conmutación. La Figura 2.4 presenta el voltaje de CA en el lado secundario del transformador convertidor, el voltaje rectificado en el lado del convertidor y la corriente CA (fase a) en el lado del convertidor del transformador [4].

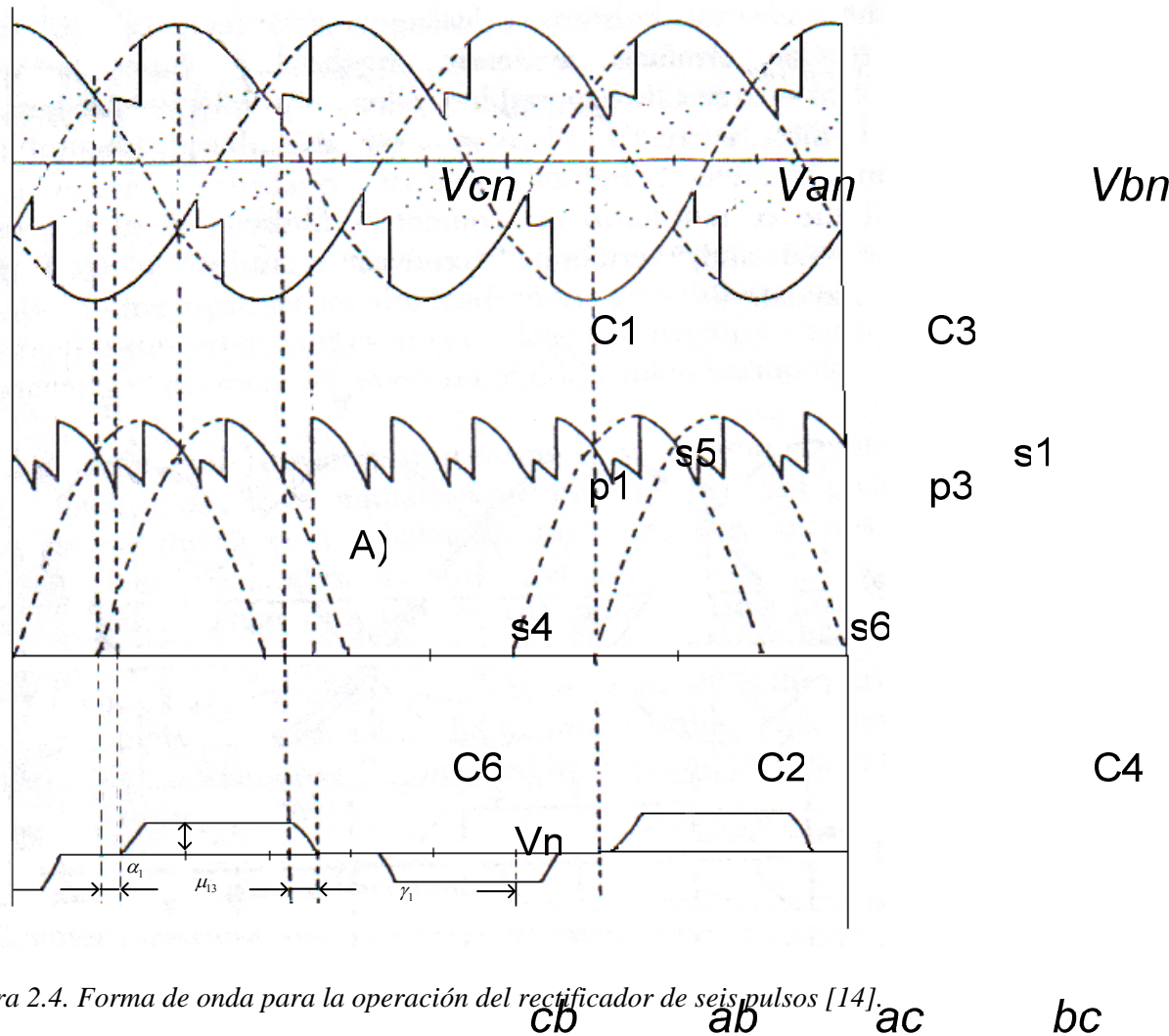


Figura 2.4. Forma de onda para la operación del rectificador de seis pulsos [14].

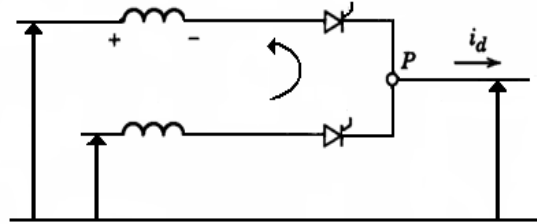
- A) Voltaje directo positivo y negativo con respecto al neutro del transformador
 B) Voltaje directo del puente V_d
 C) Corriente de línea CA (fase a)

2.5 ANÁLISIS DE CONMUTACION DEL CIRCUITO

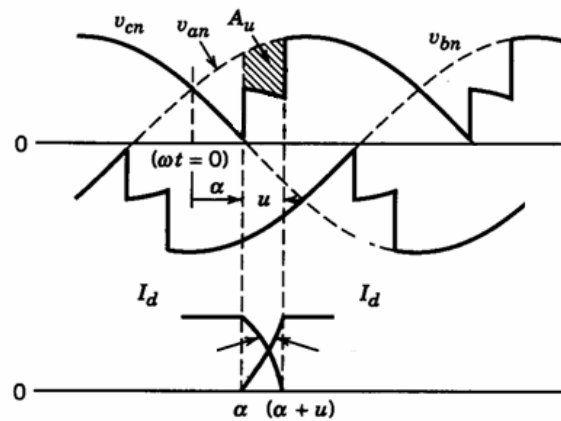
El proceso de rectificación o inversión en una estación convertidora se obtiene a través de la conmutación natural. En este proceso las válvulas actúan como interruptores que se ponen en operación de manera secuencial de acuerdo a la señal de disparo como se muestra en la Figura 2.5, durante el periodo de conmutación las válvulas T1 a la T3 están conduciendo como se muestra en la Figura 2.5A, para la válvula T1 y T3 de la figura tenemos

$$V_{bn} - V_{an} = L_s \frac{di_3}{dt} - L_s \frac{di_1}{dt}$$

La conmutación para la válvula T1 a la válvula T3 puede comenzar (por el disparo en T3) en un tiempo u después se cruzan el voltaje superior entre las fases a y b (y deben ser completadas antes de que crucen esos dos voltajes).



(A)


 X_{ca}
 X_{cb}

(B)

Figura 2.5. Forma de onda para el proceso de conmutación [4, 14].

para $a > b$, una corriente de conmutación $i_c (=i_3)$ se acumula i_1 , de modo que siempre

$$i_1 + i_3 = I_d \quad (2.1)$$

La caída de voltaje a través de las reactancias de conmutación x_{ca} , x_{cb} y x_{cc} son iguales y así durante el periodo de traslape el voltaje directo es el valor medido de b y a.

Para el circuito de la figura 2.6a y asumiendo que $x_{ca} = x_{cb} = x_{cc}$ podemos escribir

$$V_a - V_b = 2 \left(\frac{x_c}{\omega} \right) \frac{d(i_c)}{dt} \quad (2.2)$$

Tomando como referencia el voltaje entre la fase V_a y V_b

$$V_b - V_a = \sqrt{2} a V_{term} \sin \omega t$$

Donde V_{term} es el voltaje r.m.s fase a fase referido al secundario del lado del convertidor y “a” es la posición del tap del transformador.

La ecuación 2.2 puede también ser escrita como

$$\frac{1}{\sqrt{2}} a V \sin(\omega t) d(\omega t) = x_c di_c \quad (2.3)$$

Integrando para $\omega t = \alpha$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \int_{\alpha}^{\omega t} a V_{term} \sin(\omega t) d(\omega t) = x_c \int d(i_c) \quad (2.4)$$

La expresión instantánea para la corriente de conmutación es

$$i_c = \frac{a V_{term}}{\sqrt{2} x_c} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)] \quad (2.5)$$

Y sustituyendo la condición final, es decir $i_c = I_d$ en $\omega t = \alpha + \mu$ obtenemos

$$I_d = \frac{a V_{term}}{\sqrt{2} x_c} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)] \quad (2.6)$$

2.6 OPERACIÓN DEL RECTIFICADOR

En la figura 2.4 P indica un disparo instantáneo (P_1 es el disparo instantáneo de la válvula 1), S indica el final de la conmutación (en S_1 la válvula 5 para de conducir) y C es un voltaje que cruza (C_1 indica el cruce positivo entre la fase c y a). La grafica ilustra el positivo (determinado por la conducción de la válvula 1, 3 y 5) y el negativo (determinado por la conducción de la válvula 2, 4 y 6) el potencial con respecto a el neutro del transformador, la grafica B indica la forma de onda de salida del voltaje directo y la grafica C la corriente en la

fase a. Las siguientes expresión puede ser fácilmente derivada para la salida del voltaje promedio con respecto a la forma de onda de la Figura 2.5B.

$$V_d = \left(\frac{1}{2}\right)V_{co} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)] \quad (2.7)$$

Donde V_{co} es el máximo voltaje CD promedio (es decir, no hay carga en el disparo del ángulo); para el puente trifásico la configuración del puente es $V_{co} = \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right)aV_{term}$ y aV_{term} es el voltaje de conmutación r.m.s fase-fase.

La ecuación 2.7 especifica el voltaje directo CD en términos de aV_{term} y (α, μ) . Sin embargo el valor del ángulo de conmutación no es normalmente proporcionado y una expresión más útil para el voltaje directo es, en función de corriente CD puede ser derivada de la ecuación 2.6 y 2.7 es decir:

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}aV_{term} \cos \alpha - \frac{3x_c}{\pi}I_d \quad (2.8)$$

La magnitud r.m.s de la forma de onda de la corriente rectangular (no toma en cuenta el traslape de la conmutación) se utiliza a menudo para definir los MVA del transformador convertidor, es decir

$$I_{rms} = \sqrt{\left\{ \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} I^2 d(\omega t) \right\}} = \sqrt{2}I_d\sqrt{3} \quad (2.9)$$

Desde entonces los armónicos de los filtros se asumen que son proporcionados por las terminales del convertidor, la corriente que fluye en los sistemas de CA contiene solamente la componente fundamental de frecuencia y la magnitud r.m.s (obteniendo para el análisis de Fourier la forma de onda rectangular) es:

$$I_1 = I_d\sqrt{\frac{6}{\pi}} \quad (2.10)$$

Si el efecto de la reactancia de conmutación es tomado en cuenta y usando las ecuaciones 2.5 y 2.6 la corriente entrante y saliente durante la válvula de conmutación esta definida por la ecuación 2.11 y 2.12 respectivamente.

$$i = \frac{I_d (\cos \alpha - \cos \omega t)}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)} \text{ para } \alpha < \omega t < \alpha + \mu \quad (2.11)$$

$$i = I_d - I_d \frac{\cos \alpha - \cos(\omega t - 2\pi/3)}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)} \text{ para } \alpha + \frac{2\pi}{3} < \omega t < \alpha + \frac{2\pi}{3} + \mu \quad (2.12)$$

Durante la conmutación, la corriente es (2.13)

$$i = I_d \quad \text{para } \alpha + \mu < \omega t < \frac{2\pi}{3} + \alpha \quad (2.13)$$

La componente fundamental de la forma de onda de la corriente definida por la ecuación 2.11, 2.12 y 2.13 es

$$I = k \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (2.14)$$

Donde

$$k = \sqrt{\left\{ [\cos 2\alpha - \cos(\alpha + \mu)]^2 + [2\mu + \text{sen}2\alpha - \text{sen}2(\alpha + \mu)]^2 \right\} / \left\{ 4[\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)] \right\}} \quad (2.15)$$

y tomando en cuenta la posición del tap, la corriente en el lado primario llega hacer

$$I_p = k \frac{\sqrt{6}}{\pi} a I_d = k_1 I_d \quad (2.16)$$

Donde k para cuestiones prácticas es cerrado a uno en flujos de potencia, Puede ser asumido como una constante $k=0.995$ [4, 7].

2.7 OPERACIÓN DEL INVERSOR

Con respecto a la Figura 2.6A y B, una conmutación de la válvula 1 a la válvula 3 (en P3) es solamente posible mientras la fase V_{bn} es positiva con respecto a la fase V_{an} . Además, la conmutación no debe terminar antes de C6, pero un cierto margen de ángulo de conmutación $\gamma_1 (> \gamma_0)$ debe ser permitido para la válvula 1, el cual para conducir, a reestablecer su capacidad de bloqueo. Esos puntos son un límite en el máximo ángulo de disparo $\alpha = \pi - (\mu + \gamma_0)$ para la operación exitosa del inversor. Si estos límites fueron excedidos, la válvula 1 deberá tomar la corriente otra vez, causando una conmutación fallida.

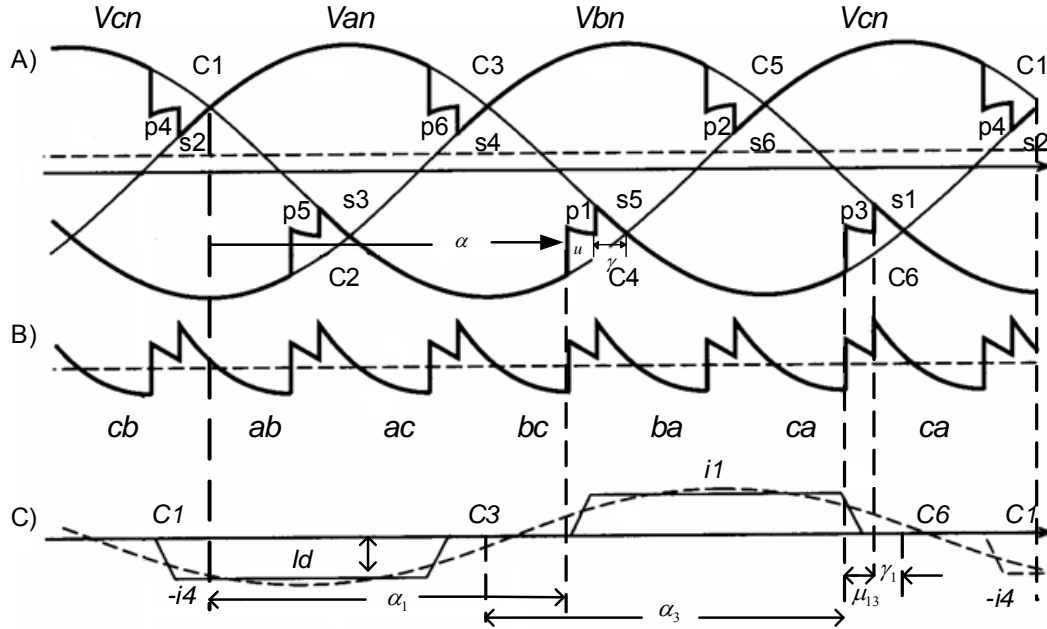


Figura 2.6 Forma de onda de la operación del inverso [4].

A) Voltaje directo positivo y negativo con respecto al neutro del transformador

B) Corriente de la línea CA de la fase a

Esta es la fundamental diferencia entre la operación del rectificador y el inversor. El cual previene una condición óptima de disparo en el último caso. Aunque el ángulo de retraso del rectificador α puede ser elegido para satisfacer un particular restricción de control, no es posible el mismo para el ángulo γ por la incertidumbre del ángulo de conmutación μ , el

minimo margen de conmutación del ángulo γ_o debe ser lo suficiente razonable (valores entre los 15° y 20° son típicamente usados) [11].

El análisis de la operación del inversor no es diferente del rectificador, sin embargo, por conveniencia, las ecuaciones del inversor son a menudo expresadas en términos del margen de conmutación del ángulo γ ($\gamma = \beta - \mu$, donde $\beta = \pi - \alpha$).

Así omitiendo la señal negativa del voltaje de CD del inversor, expresiones son

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} aV_{term} \cos \gamma - \frac{3x_c}{\pi} I_d \quad (2.17)$$

La expresión para la corriente directa es:

$$I_d = \frac{aV_{term}}{\sqrt{2}x_c} [\cos \gamma - \cos \beta] \quad (2.18)$$

Debido al retraso de encendido del ángulo de conmutación, la corriente del convertidor en cada fase siempre retrasa al voltaje (referido a la Figura 2.5 C) el rectificador, por lo tanto, absorbe corriente (consume potencia reactiva).

La presencia de los filtros no distorsiona los flujos de corriente mas allá del punto de filtración y el factor de potencia puede ser aproximadamente por el factor desplazamiento ($\cos \phi$) donde ϕ es la diferencia de fases entre la frecuencia fundamental de voltaje y componentes de corrientes.

Bajo las condiciones ideales, despreciando las perdidas y asumiendo la potencia activa de CA es la misma que la potencia activa CD, es decir

$$P = \sqrt{3}aV_{term} I \cos \phi = V_d I_d \quad (2.19)$$

Donde I esta dada por la ecuación (2.16)

2.8 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE HVDC

Los sistemas de transmisión de corriente directa existentes en la actualidad pueden ser agrupados como las siguientes categorías:

2.8.1 Monopolar

El enlace monopolar presentado por la Figura 2.8 [1, 13, 11], tiene un conductor usualmente de polaridad negativa con retorno por tierra o mar. Este tipo de configuraciones fueron las primeras en utilizarse debido a su bajo costo por el uso de solo dos estaciones convertidoras y una línea de transmisión. El retorno se realiza mediante electrodos conectados a las estaciones de conversión, que hacen las funciones de ánodo y cátodo. Este tipo de conexiones se utiliza cuando los sistemas a conectar están separados por grandes distancias y donde la no instalación del cable de retorno puede suponer un ahorro considerable. Algunos sistemas monopolares incluyen un retorno metálico cuando no es posible realizarlo mediante electrodos conectados a tierra (normalmente por cuestiones medioambientales) o cuando las pérdidas son demasiado importantes.

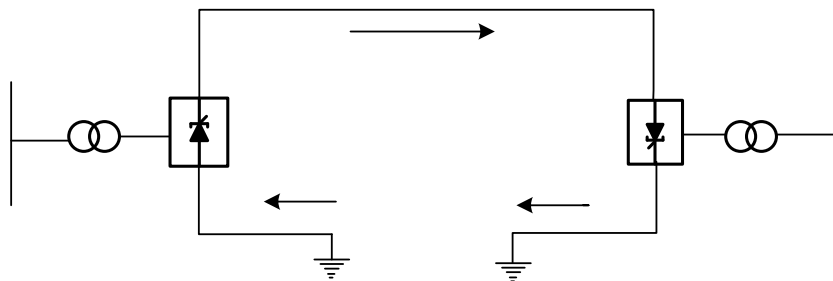


Figura 2.7. Enlace monopolar retorno por tierra [13].

2.8.2 Bipolar

En la Figura 2.8 [1, 11, 13], se presenta la conexión bipolar. Este tipo de esquemas utiliza dos conductores, uno positivo y el otro negativo. A su vez, cada terminal tiene dos convertidores de igual nivel de tensión conectado en serie en el lado de CD y aterrizado en el punto neutro evitando la necesidad de la utilización de un conductor de retorno. Esta configuración es utilizada cuando se supera la capacidad de un enlace monopolar, la mayoría de los enlaces HVDC con línea aérea son construidos en forma bipolar.

Los enlaces bipolares pueden estar conectados a tierra mediante electrodos o conectados entre ellos mediante un cable de retorno. Sea cual sea el sistema, este electrodo tan sólo lleva la diferencia entre ambos polos. Su función es similar a la del neutro en un sistema trifásico.

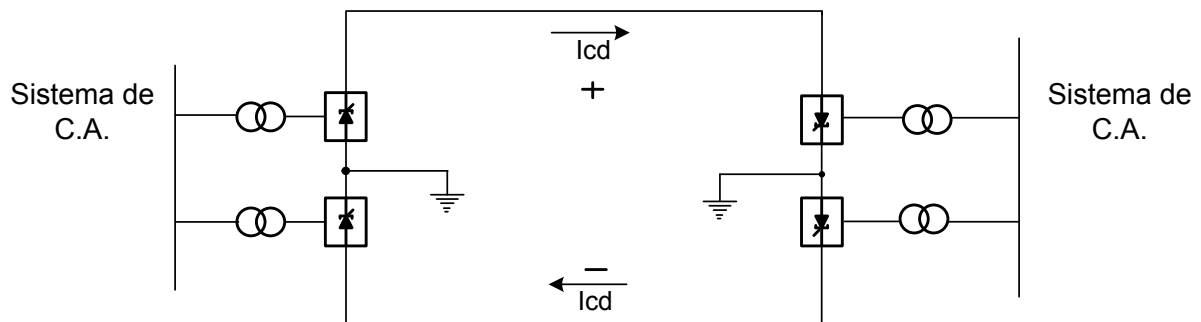


Figura 2.8. Enlace bipolar [13].

2.8.3 Homopolar

En la Figura 2.9 [1, 11, 13], se presenta la conexión homopolar. Esta conexión comprende dos o más conductores con la misma polaridad, por lo general negativa, y siempre operando con el retorno por tierra. En este arreglo cada estación convertidora consiste de un polo positivo y un polo negativo, cada polo consta de dos convertidores trifásicos conectados a través de un

transformador Y-Y y Y- Δ para producir un arreglo de 12 pulsos. Su principal desventaja es que la corriente de retorno por tierra puede tener efectos sobre las tuberías de gas o petróleo que estén a pocos kilómetros de los sistemas de electrodos. Las tuberías pueden servir como conductoras de la corriente de retorno la cual puede causar corrosión en el metal.

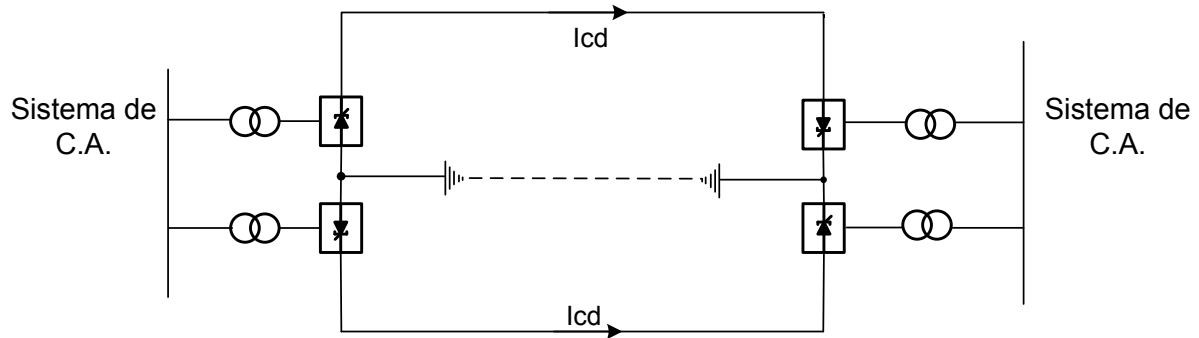


Figura 2.9. Enlace homopolar [13]

2.8.4 Back-to-Back

Es una extensión del enlace bipolar con la diferencia que las estaciones convertidoras se encuentran conectadas a través de un reactor serie; la aplicación de este esquema se utiliza para conectar dos SEP asíncronos cercanos entre sí, en la Figura 2.10, se muestra este tipo de configuración [1, 11, 13].

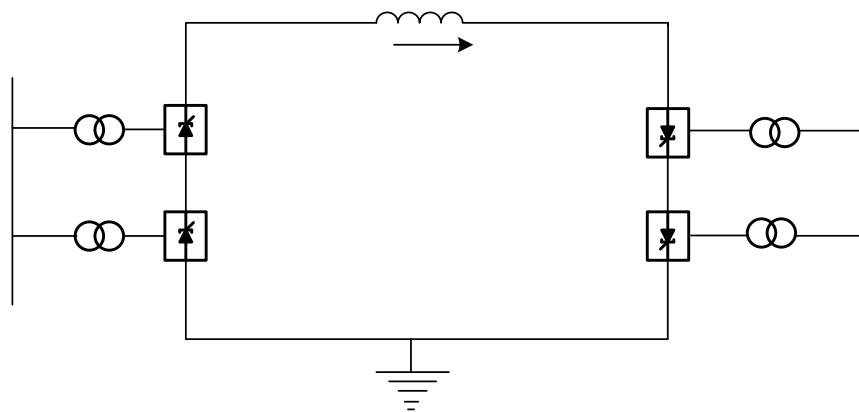


Figura 2.10. Enlace back-to-back [13]

2.8.5 Sistema Multiterminal

Un sistema HVDC, que incorpora más de dos terminales a un sistema es llamado multiterminal (por sus siglas en inglés MTDC), desde 1960 se ha investigado el funcionamiento básico del sistema multiterminal, su operación ha sido demostrada con simuladores en algunas ocasiones y recientemente se han hecho planteamientos de proyectos contemplando dichos sistemas [13].

Un sistema de transmisión de corriente directa multiterminal comprende tres o más estaciones convertidoras operando a un voltaje o corriente común. A diferencia de un sistema de transmisión convencional de CD, cada terminal puede ser operada con diferentes niveles de corriente y potencia proporcionando así un mayor grado de flexibilidad de operación y de controlabilidad del sistema. Existen básicamente dos tipos de enlaces de CD multiterminales: sistema conectado en paralelo operando con un voltaje constante y sistema conectado en serie operando con una corriente constante. Los esquemas pueden ser monopolares o bipolares [11].

Y el aumento en las pérdidas de $I_{cd}^2 R$ aún para niveles de carga ligera y la falla en un sistema multiterminal la falla en una línea de corriente directa provoca la interrupción total del sistema MTCD [11, 13]. Independientemente de consideraciones técnicas la emergencia de una apropiada aplicación a sido el principal estímulo de aceptación de los enlaces multiterminal como una alternativa en diferentes países. En la Figura 2.11, se presenta la configuración de un enlace de cuatro terminales [13].

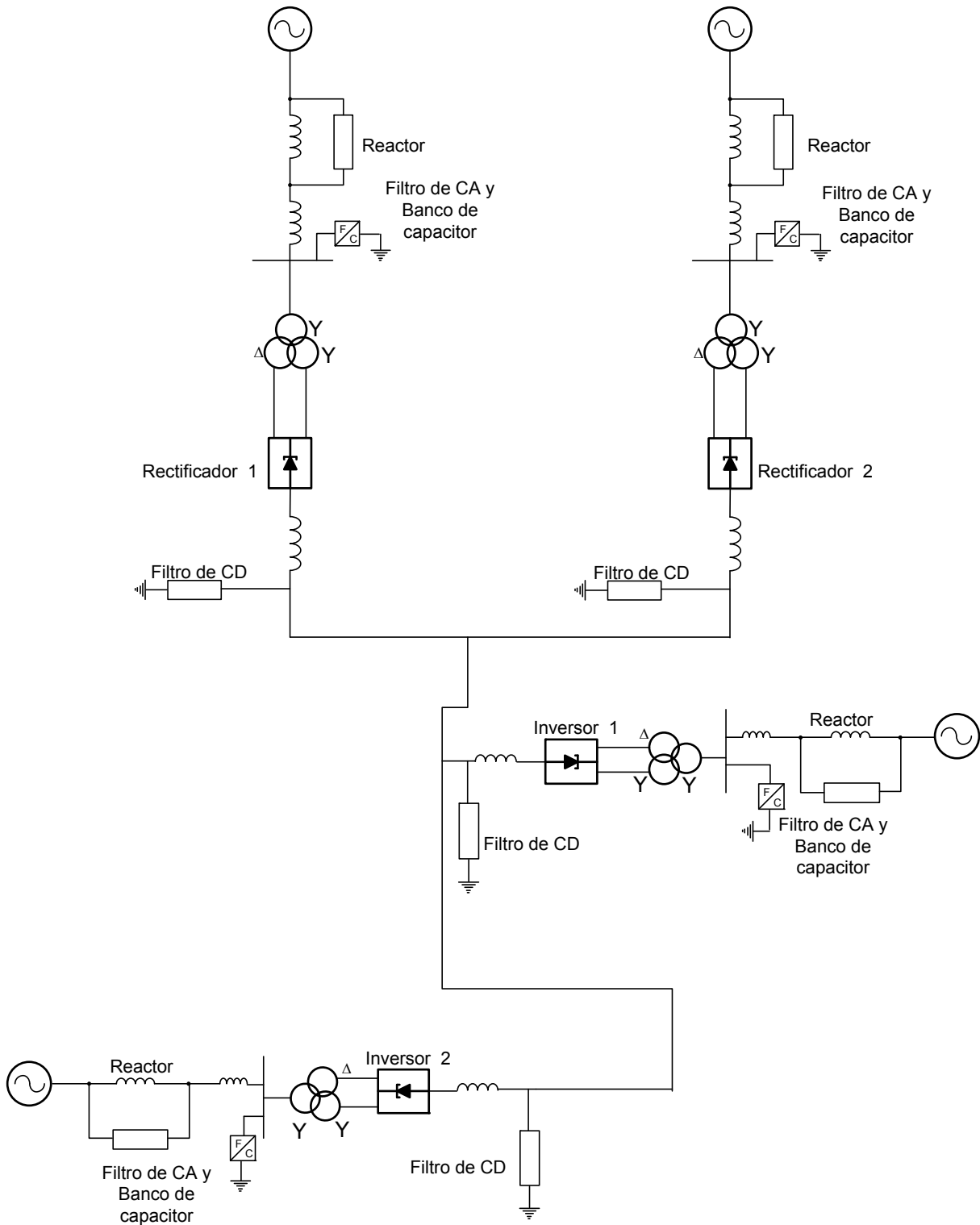


Figura 2.11. Componentes de un sistema de HVDC (Sistema de cuatro terminales) [13]

2.9 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE HVDC

Un sistema de HVDC, consiste básicamente de una línea de transmisión de corriente directa que interconecta dos sistemas de corriente alterna: la conexión del sistema de CD con el sistema de CA se realiza mediante asociaciones convertidoras; una estación actúa como rectificador mientras que la otra actúa como inversor. En ambos casos, las estaciones convertidoras operan bajo el principio de conmutación natural de los voltajes de línea, permitiendo así que la transmisión de potencia sea independiente de las frecuencias de los sistemas de corriente alterna [1, 13]. Los componentes asociados con la transmisión de HVDC de un sistema se representan por la Figura 2.11, usando como ejemplo un sistema de cuatro terminales;

En seguida se hace una descripción de los componentes de un sistema de HVDC:

2.9.1 Estaciones convertidoras

Es un dispositivo donde se lleva a cabo la conversión de CA a CD o viceversa. La posibilidad de que la estación convertidora pueda operar como rectificador o como inversor hace posible la inversión de la potencia de transmisión. Para transportar la energía utilizando HVDC, es necesario convertirla de CA a CD para posteriormente realizar la transformación inversa, de CD a CA. Este doble proceso es realizado con válvulas de tiristores que se arreglan normalmente como un convertidor de 12 pulsos. Las válvulas están conectadas con el sistema de CA por medio de transformadores del convertidor que son colocados normalmente en un edificio.

2.9.2 Transformador convertidor

Los transformadores del convertidor son el equipo más pesado de una estación convertidora de la transmisión de HVDC. La función de los transformadores es conectar las redes de CA con

el convertidor y ajustar el voltaje en el lado del convertidor a un nivel conveniente. Además, se adaptan al alto contenidos de armónicos generados por los convertidores.

Los transformadores pueden ser de diversos diseños dependiendo de la energía que se va a transmitir. El transformador convertidor tiene varias funciones las cuales son: regular la tensión de CD a través de tap, transformar el voltaje entre la fuente de CA y el sistema de HVDC, etc.

2.9.3 Reactor serie

Las estaciones convertidoras producen voltajes armónicos pares en el lado de CD por lo que se utiliza un reactor en serie con el objetivo de disminuir el rizo en la corriente directa en el enlace y la corriente de falla.

2.9.4 Filtros de CA y CD

Las estaciones convertidoras generan armónicos tanto en el lado de CA como en el lado de CD que pueden causar sobrecalentamiento en los bancos de capacitores y generadores cercanos, e interferencia con los sistemas de telecomunicaciones. El reactor serie ayuda a disminuir los armónicos en el lado de CD y para el lado de CA se pueden utilizar filtros activos obtenidos de la aplicación de electrónica de potencia.

Los filtros en el lado de CA de la estación convertidora se encargan de absorber los armónicos generados por el convertidor y de proporcionar una parte de la potencia reactiva que necesita el convertidor. Estos filtros se instalan en el lado de CD para reducir la componente de CA de la señal continua que se desea obtener (reducción del rizado).

2.9.5 Fuentes de potencia reactiva

Las estaciones convertidoras absorben potencia reactiva la cual, en diseños convencionales, debe ser proporcionada por dispositivos de compensación como son: *Capacitores*

Conmutadores por Tiristores (CCTs), Compensadores Estáticos de VARs (CEVs) y compensadores síncronos.

2.10 CONTROL DEL ENLACE DE HVDC

Existen diferentes formas de controlar la energía a través de una línea de CD. Un sistema de transmisión de HVDC es altamente controlable. Con el objetivo de establecer una operación eficiente, estable y sostener una máxima flexibilidad de control de voltaje sin comprometer la seguridad del equipo, son usados varios tipos de control [1, 4, 11, 25].

2.10.1 Principio básico de control

La transmisión básica de un circuito de CD puede ser representada por la Figura 2.12 [1]. Es la representación para estudios de flujos de potencia en estado estacionario. Donde la Figura 2.12 representa una línea monopolar o una línea bipolar. La transmisión de la línea es representada por la R_L , La estación del lado izquierdo es la del rectificador utilizando el subíndice r y la estación del lado derecho es la del inversor la cual esta representada por el subíndice

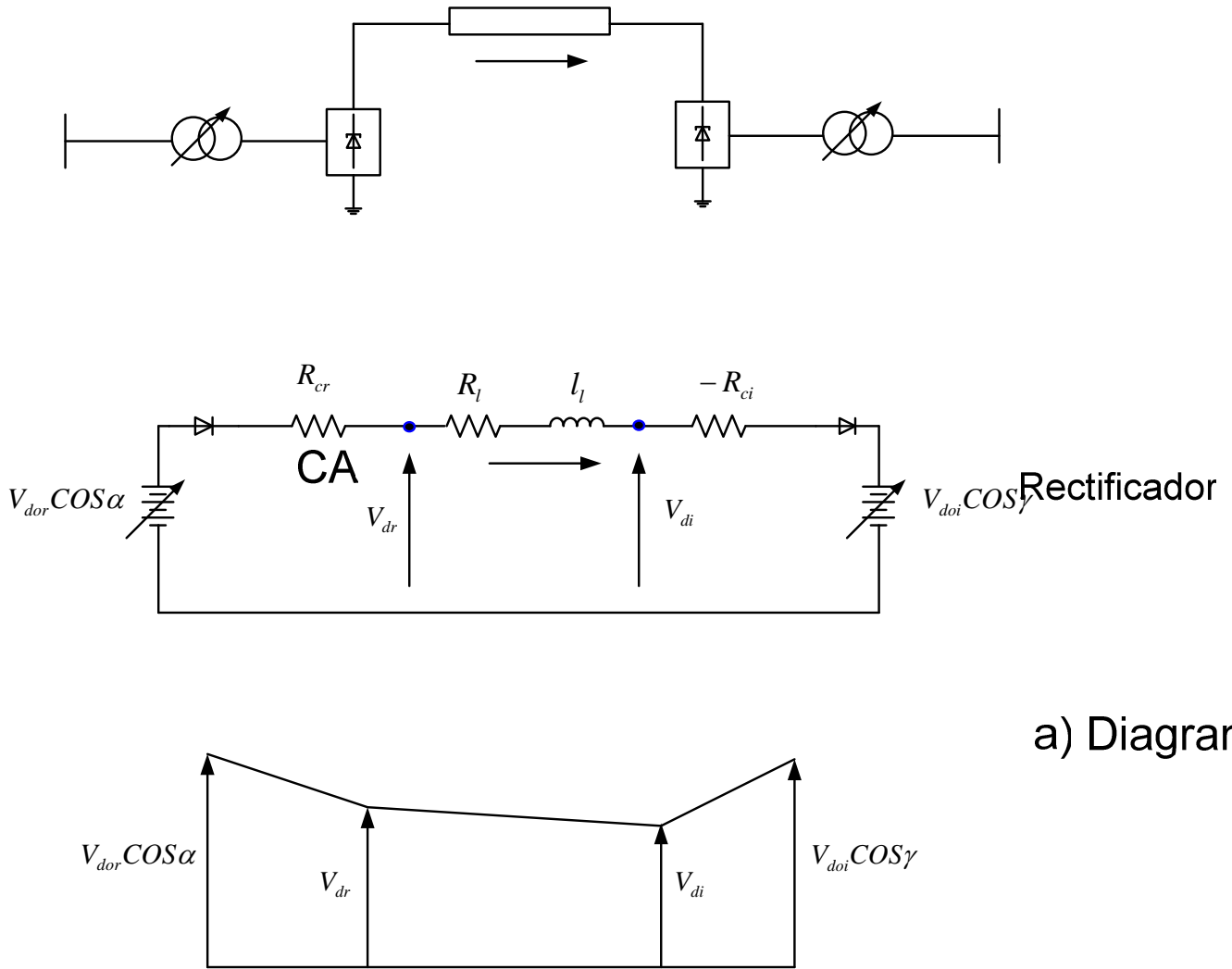


Figura 2.12. Transmisión de una línea de HVDC [1]

La corriente que fluye del rectificador al inversor es

$$I = \frac{V_{dr} - V_{di}}{R} \tag{2.20}$$

Sustituyendo apropiadamente las expresiones para V_{dr} y V_{di} nosotros tenemos

$$I_d = \frac{V_{dor} \cos \alpha - V_{doi} \cos \gamma}{R + R_{cr} + R_{ci}} \tag{2.21}$$

a) Diagrama

b) Circuito e

La potencia en las terminales del convertidor es

$$P_{dr} = V_{dr} I_d \quad (2.22)$$

La potencia en las terminales del inversor es

$$P_{di} = V_{di} I_d = P_{dr} - R_L I_d^2 \quad (2.23)$$

El voltaje directo en algún punto de la línea y la corriente (o potencia) pueden ser controlados por cualquier alternativa de estas cuatro posibilidades:

- a) *El control del ángulo del rectificador α .*
- b) *El control del ángulo del inversor γ .*
- c) *Control del voltaje de CA del transformador rectificador, por medio del cambiador del tap.*
- d) *Control del voltaje de CA del transformador inversor, por medio del cambiador del tap.*

El control operando bajo el principio de corriente constante en el rectificador variando α y en el inversor el voltaje se mantiene constante a través del control del ángulo de extinción γ constante. El control de las válvulas es muy rápido de (1 a 10 ms), sin embargo el cambiador de tap es más lento de (5 a 6 s por paso) y se utilizan en una manera complementaria. El control de las válvulas es usado inicialmente para una acción rápida, seguido por el cambiador de tap, para restablecer el convertidor al rango normal de α para el rectificador y γ para el inversor [1].

2.10.2 Conceptos básicos para la selección del control

Las siguientes consideraciones influyen en la selección del control

1. Prevención de grandes fluctuaciones en CD debido a variaciones de voltaje en el sistema de CA.
2. Mantener cerca el voltaje directo del valor recomendado.

3. Mantener el valor del factor de potencia enviado y recibido tan alto como sea posible.
4. Prevenir una falla de conmutación en el inversor.

El control rápido del convertidor previene largas fluctuaciones en la corriente directa lo cual, es un importante requerimiento para satisfacer la operación de la línea de HVDC. Refiriéndonos a la Figura 2.12, la resistencia de las líneas y el convertidor son muy pequeñas; por lo tanto, un cambio en V_{dor} y V_{doi} causa un gran cambio en I_d . Por ejemplo, un cambio del 25% en el voltaje en cualquier rectificador o inversor podría causar un cambio pequeño en la corriente directa del 100%. Esto implica que ambos, α y γ son mantenidos constantes, la corriente directa puede variar de par en par para un pequeño cambio en la magnitud del voltaje alterno en cualquier extremo. Tales variaciones son generalmente indeseables para una operación satisfactoria del sistema de potencia. Además las corrientes altas pueden dañar las válvulas y el resto del equipo. Por lo tanto un control rápido que previene las fluctuaciones de corriente directa es esencial para un apropiado funcionamiento del sistema; sin tal control el sistema de HVDC puede ser impracticable.

2.11 ESCRIPCIÓN DE LOS ESQUEMAS DE CONTROL

En condiciones normales de operación, el rectificador trabaja bajo control de corriente constante (CC) y el inversor trabaja con un control para mantener el ángulo de extinción constante (AEC). El punto de operación estará dado por el punto de intersección de las características de operación del rectificador e inversor, como se muestra en la Figura 2.13. El punto de operación se obtiene al desprestigiar la caída de voltaje en la línea de CD, es decir, $V_R = V_{dl}$ [1, 4, 13].

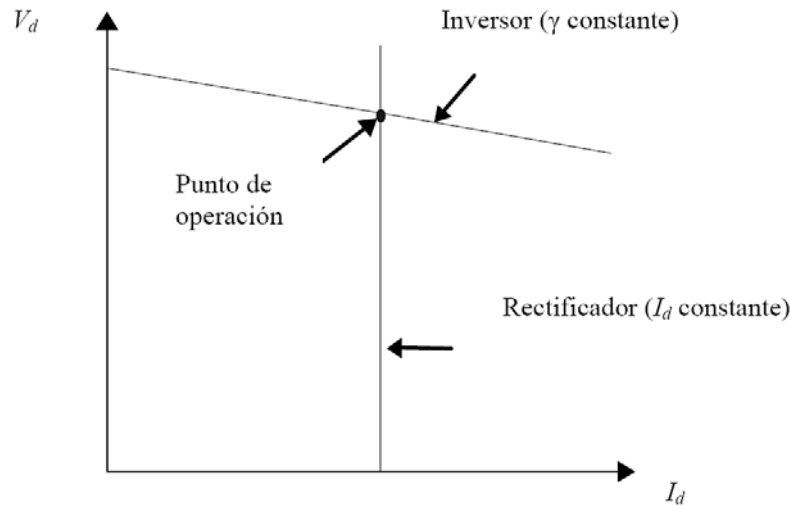


Figura 2.13. Características ideales del estado estable V-I [11]

La característica del rectificador puede ser ajustada horizontalmente al variar el ángulo de encendido α o el tap del transformador a_R . La característica del inversor puede moverse sobre el eje horizontal al cambiar el tap del transformador a_I . Una ventaja de este esquema de control es que el punto de operación no se ve afectado por pequeñas variaciones de voltaje que puedan acontecer en el lado del rectificador. Una representación más realista de las características del rectificador e inversor se muestra en la Figura 2.14, donde cada control afecta tanto a la corriente I_d como al voltaje V_d .

La característica del rectificador consiste en dos segmentos de línea: una para operación con ángulo de encendido mínimo constante y otra para CC. De igual manera con la finalidad de evitar grandes cambios en la corriente o potencia causados por cambios moderados en V_d , el inversor también está equipado con un regulador de corriente.

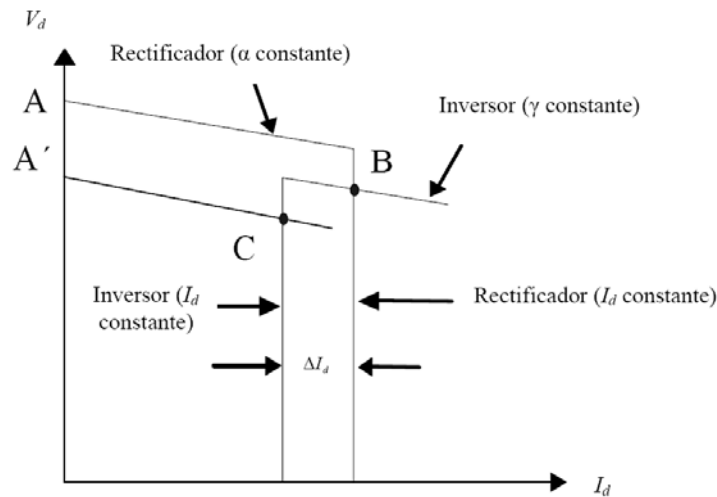


Figura 2.14. Característica de estado estable del rectificador e inversor [11].

Durante la operación normal, la característica de corriente constante del rectificador intersecta la característica de ángulo de extinción mínimo del inversor siendo B el punto de operación del enlace.

Al acontecer un decremento del voltaje de CA en el lado rectificador, es necesario ajustar el tap del transformador y/o decrementar el ángulo de encendido con la finalidad de mantener V_d del rectificador en el valor especificado. Si lo anterior no es suficiente, tal que V_d cae por debajo de A' , un valor de $\alpha < \alpha_{\min}$ será necesario para mantener el enlace operando en el punto B. Si esto pasa, α es fijado en α_{\min} y el enlace opera en otro modo de control donde el rectificador trabaja con el ángulo de encendido mínimo y el inversor con un control de CC.

Esto último se logra al incrementar el ángulo de extinción γ . De tal manera, el nuevo punto operativo es C, en el cual el control de corriente del inversor fija el valor de corriente a un valor menor que el control de corriente del rectificador. La diferencia entre ambos valores de corriente se denomina margen de corriente ΔI_d .

MODELADO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA AC-DC PARA ESTUDIO DE ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS



3.1 INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se estudia la estabilidad ante pequeños disturbios considerando la influencia de un enlace de HVDC, el cual tiene un impacto importante en cuanto a la estabilidad de los SEP's. También se plantean los modelos de transmisión más representativos de CD aérea y subterránea. Para la aplicación del análisis modal, el modelo del sistema dinámico es puesto en variables de estado y se describe también la solución de linealizar no convencional *perturbaciones en cada estado*. Para dicho análisis se considera diversos sistemas de prueba los cuales son descritos en el capítulo 4.

La participación de las variables de estado en los modos del sistema, puede obtenerse por medio de una matriz de participación, la cual combina eigenvectores derechos y eigenvectores izquierdos de cada modo del sistema, de manera gráfica se muestra el comportamiento de las formas modales en función de los eigenvectores derechos, las cuales son cantidades complejas adimensionales que proporcionan información sobre el comportamiento de un sistema dinámico.

3.2 MODELO DEL ENLACE DE HVDC.

En la aproximación considerada en este trabajo, la línea de transmisión se representa mediante un circuito RL despreciando el efecto capacitivo en las líneas de transmisión aéreas mostrado en la Figura. 3.1.

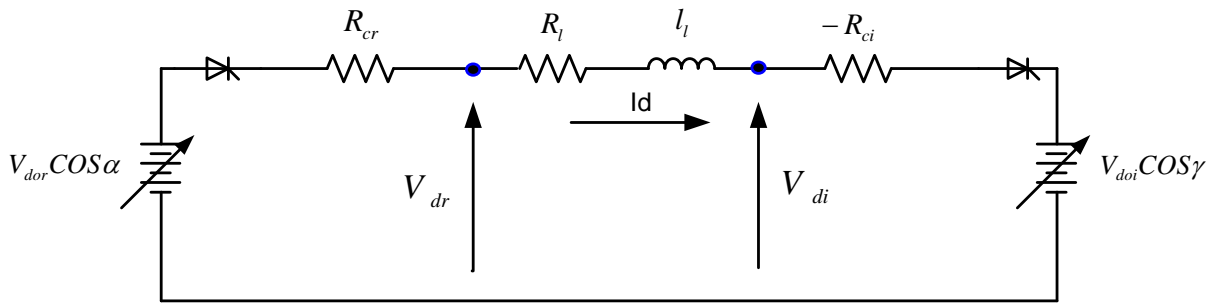


Figura.3.1 Diagrama unifilar del enlace de HVDC.

En este modelo la I_d en el enlace de CD se considera una variable de estado y su comportamiento dinámico está definido por la ecuación (3.1), los parámetros se muestran en el apéndice A.

$$\frac{d}{dt} I_{cd} = \frac{1}{L} (V_{cdr} - V_{cdi} - R_{cd} I_{cd}) \quad (3.1)$$

3.3 MODELO DEL CABLE DE HVDC

El cable de CD se representa por medio de un circuito T en donde la capacitancia se conecta en la rama en paralelo y las inductancias en serie representan las reactancias equivalentes de conmutación y de los puentes, mostrado en la Figura. 3.2 [11].

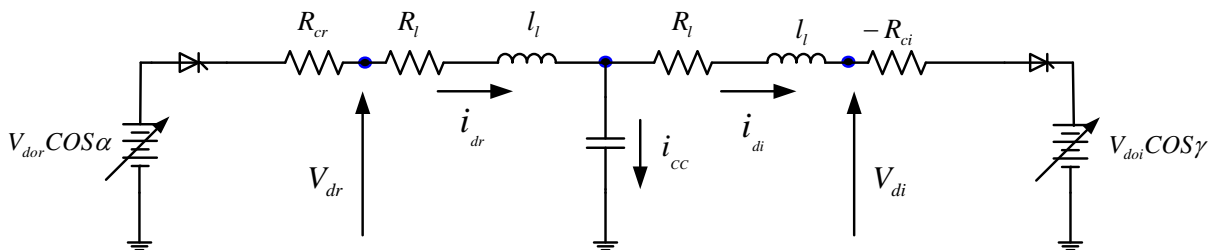


Fig. 3.2. Diagrama unifilar del cable de HVDC.



De este modelo se consideran tres ecuaciones de estado y su comportamiento dinámico esta definido por las ecuaciones (3.2), (3.3) y (3.4).

$$\frac{d}{dt}i_{dr} = \frac{1}{L}(V_{dr} - V_{cc} - R_L i_{dr}) \quad (3.2)$$

$$\frac{d}{dt}i_{di} = \frac{1}{L}(-V_{di} + V_{cc} - R_L i_{di}) \quad (3.3)$$

$$\frac{d}{dt}v_{cc} = \frac{1}{c}(i_{dr} - i_{di}) \quad (3.4)$$

3.4 MODELO DEL CONTROL DE HVDC.

En las Figura. 3.3 y 3.4 podemos ver los diagramas a bloques de los controles de la línea de CD utilizados en este trabajo [17]. El cual comprende un control proporcional-integral (PI) operando bajo el principio de corriente constante en el rectificador y en el inversor el voltaje se mantiene constante a través del control del ángulo de extinción.

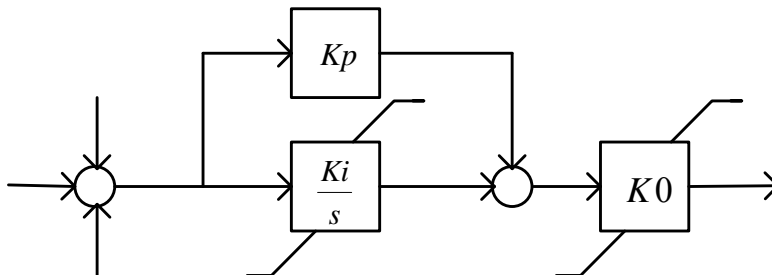


Figura 3.3. Diagrama de control del rectificador [1, 17].

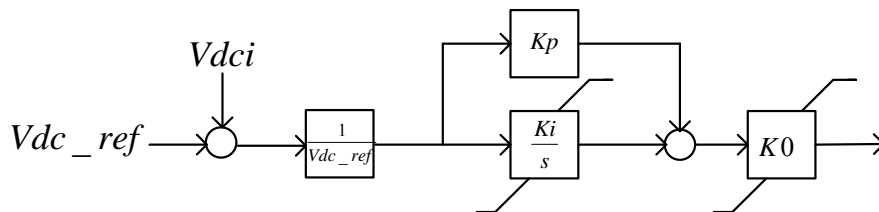


Figura 3.4 Diagrama de control del inversor [11, 17].



De donde se obtiene la representación de interés en (3.5) y (3.7). Las ecuaciones de los ángulos de disparo y extinción se calculan de forma algebraica (3.6) y (3.8).

$$\frac{d}{dt}V_{_conr} = k_i(i_{dr} - i_{cd_ord} + i_{dc_mod}) \quad (3.5)$$

$$\alpha = [(i_{dr} - i_{cd_ord} + i_{dc_mod})K_p + V_{_conr}]K_o \quad (3.6)$$

$$\frac{d}{dt}V_{_coni} = k_i(i_{di} - i_{cd_ord} + i_{dc_mod} + \frac{1}{V_{dc_ref}}(V_{dci} - V_{dc_ref}f)) \quad (3.7)$$

$$\gamma = [\frac{(V_{dci} - V_{dc_ref}f)}{V_{dc_ref}f}K_p + V_{_coni}]K_o \quad (3.8)$$

3.5 MODELO SUBTRANSITORIO DEL GENERADOR.

El modelo de sexto orden está formado por la ecuación de oscilación (3.9) y (3.10) y las ecuaciones diferenciales (3.11), (3.12), (3.13) y (3.14) que representan los transitorios eléctricos de la máquina síncrona [18, 29].

$$\frac{d}{dt}\delta = \omega - \omega_0 \quad (3.9)$$

$$\frac{d}{dt}\omega = \frac{\omega_0}{2H}(P_m - P_e) \quad (3.10)$$

$$\frac{d}{dt}E'_q = \frac{1}{T'_{do}}(V_{fd} - E'_q - (X_d - X'_d)(-i_d)) \quad (3.11)$$

$$\frac{d}{dt}E''_q = \frac{1}{T''_{do}}(E'_q - (X'_d - X''_d)(-i_d) - E''_q) \quad (3.12)$$

$$\frac{d}{dt}E'_d = \frac{1}{T'_{qo}}((X_q - X'_q)i_q + E'_d) \quad (3.13)$$

$$\frac{d}{dt}E''_d = \frac{1}{T''_{qo}}((-E'_d) + (X'_q - X''_q)i_q + E''_d) \quad (3.14)$$



3.6 MODELO TRANSITORIO DEL GENERADOR.

El modelo es de cuarto orden, esta formado por dos ecuaciones diferenciales de primer orden, que representan los transitorios eléctricos (3.15), (3.16) y dos ecuaciones diferenciales que representan los transitorios electromecánicos de la maquina síncrona (3.17) y (3.18) [18, 29].

$$\frac{d}{dt} \delta = \omega - \omega_0 \quad (3.15)$$

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \quad (3.16)$$

$$\frac{d}{dt} E'_q = \frac{1}{T'_{do}} (V_{fd} - E'_q - (X_d - X'_d)(-i_d)) \quad (3.17)$$

$$\frac{d}{dt} E'_d = \frac{1}{T'_{qo}} ((X_q - X'_q)i_q + E'_d) \quad (3.18)$$

3.7 MODELO CLÁSICO.

Este modelo es el más simple de la máquina síncrona. Este modelo considera que los enlaces de flujo del devanado de campo son constantes, es decir que el periodo de estudio es pequeño comparado con la constante de tiempo transitorio que se consideran son los transitorios de circuito abierto (E'_q es constante) y además los únicos transitorios que se consideran son los transitorios en las dos ecuaciones diferenciales d primer orden que tiene el modelo (la ecuación de balance electromecánico o ecuación de oscilación) (3.19) y (3.20) [18]

$$\frac{d}{dt} \delta = \omega - \omega_0 \quad (3.19)$$

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \quad (3.20)$$

3.8 MODELO DE LA RED..

La red de transmisión es usualmente representada por sus parámetros concentrados “equivalente π ” [18]. El comportamiento de la red es descrito por la ecuación matricial (3.21).

$$I = Y_{bus} V \quad (3.21)$$

3.9 MODELO DEL CONTROL DE VOLTAJE Y ESTABILIZADOR

Para el modelo del control de voltaje se considera un sistema de excitación de tiristores con un estabilizador de sistemas de potencia como se muestra en la Figura. (3.5) [1, 19, 35].

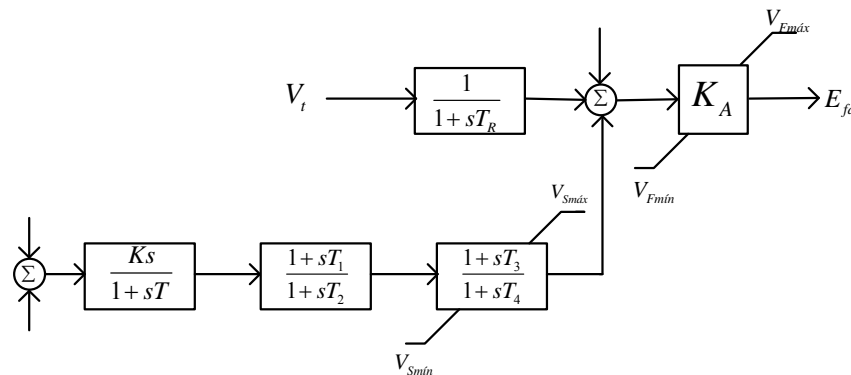


Figura. 3.5 Control de voltaje de la máquina síncrona [19].

En el sistema de excitación se utiliza una ganancia alta, sin retroalimentación derivada o reducción de la ganancia transitoria. T_R representa la constante de tiempo del transductor del voltaje terminal. La única no linealidad asociada con el sistema de excitación son los límites del voltaje de salida representados por V_{Fmax} y V_{Fmin} (3.22).

La representación del estabilizador de sistemas de potencia consiste de tres bloques:

Un bloque de compensación de fase, un bloque de restablecimiento y un bloque de ganancia.



El bloque de Compensación de fase provee la característica apropiada de adelanto de fase para compensar el atraso de fase entre la entrada al excitador y el par eléctrico en el entrehierro del generador (3.24).

El bloque de restablecimiento sirve como un filtro pasa altos, con la constante de tiempo T_1 y T_2 lo suficientemente grande para permitir que las señales asociadas con oscilaciones de T_1 pasen sin alteraciones. Sin este bloque, cambios estacionarios en la velocidad modificarían el voltaje en terminales [1]. La ganancia K_{PSS} determina la cantidad de amortiguamiento introducida por el estabilizador los parámetros se muestran en el apéndice A (3.23).

$$\dot{V}_1 = \frac{V_t - V_1}{T_R} \quad (3.22)$$

$$\dot{X}_1 = -\frac{X1}{T_3} - \frac{K_{PSS} \Delta\omega r}{T_3} \quad (3.23)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{1}{T_2} \left[\left(\frac{T_2 - T_1}{T_2} \right) (X1 + K_{PSS} \Delta\omega r) - X2 \right] \quad (3.24)$$

3.10 MODELO DEL CONTROL DE VELOCIDAD Y TURBINA

Para el modelo del control de velocidad se considera el sistema con gobernador y turbina con recalentamiento mostrado Figura. 3.6 [2]. Los parámetros son mostrados en el apéndice A.

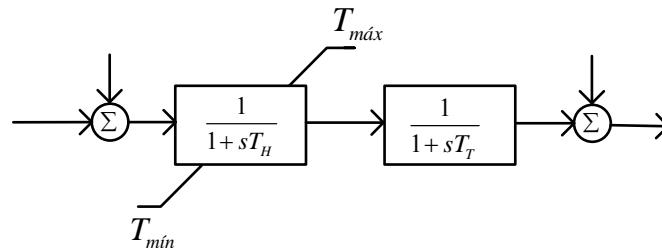


Figura. 3.6 Control de gobernador con turbina [2].



$$\dot{g} = -\frac{g}{T_H} + \frac{\omega_0 - \omega}{T_H} \quad (3.25)$$

$$\dot{p}g = \frac{g}{T_T} - \frac{pg}{T_T} \quad (3.26)$$

3.11 DEFINICIÓN QUE SE DEBEN TOMAR EN CUENTA PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD ANTE PEQUEÑOS DISTURBIOS.

En la actualidad, existen diversos comportamientos de estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia tanto de tipo transitoria como estática o pequeño disturbio. Estos fenómenos cubren un rango de tiempo, como se puede ver en la Figura 3.7. [22]

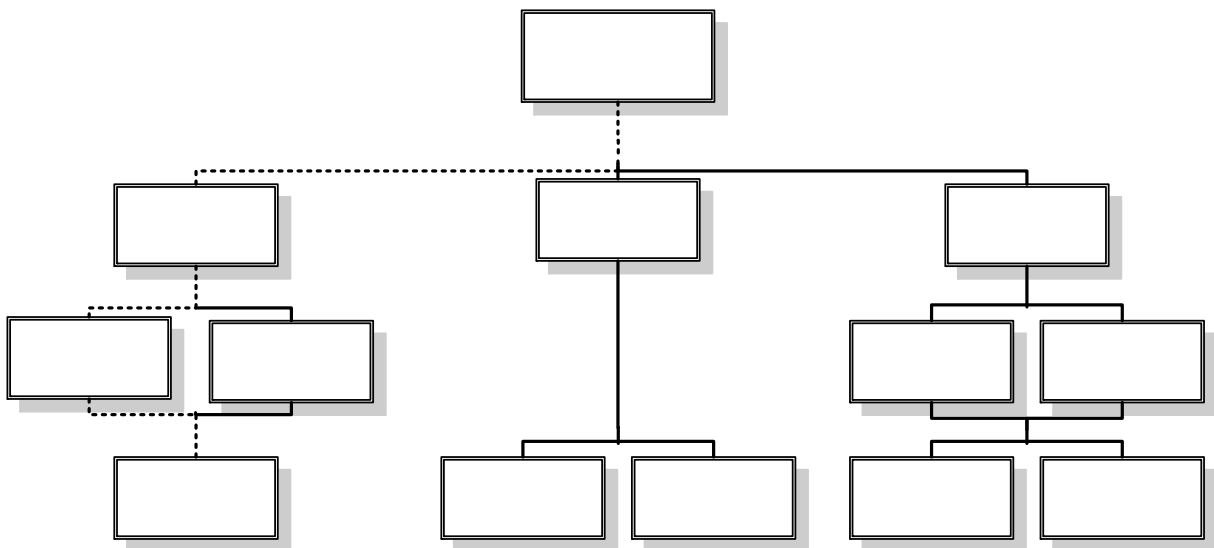


Figura 3.7. clasificación de la estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia [21].



3.11.1 Definición de conceptos relacionados con la estabilidad angular ante pequeños disturbios

3.11.1.1 *Estabilidad angular.*

La estabilidad angular es la habilidad de las máquinas síncronas de un sistema eléctrico de potencia de permanecer en sincronismo. La pérdida de sincronismo puede ocurrir entre una máquina y el resto del sistema o entre grupos de máquinas [22].

3.11.1.2 *Estabilidad ante pequeños disturbios.*

Es cuando un “*punto de equilibrio*” de un sistema inicia su dinámica y permanece cerca de el o quizás tienda hacia el conforme pasa el tiempo o puede mantenerse sobre un círculo dando vueltas indefinidamente lo que importa es que se mantenga así y también es estable. Es la habilidad del sistema de restablecer su condición inicial después de un pequeño disturbio o de alcanzar la más cercana condición inicial [22].

3.11.2 ASPECTOS GENERALES DE OSCILACIONES

Las causas de la pérdida de estabilidad durante la oscilación del sistema dependen de la magnitud de la perturbación. Es decir, depende de que la oscilación sea de pequeña señal, o de que la perturbación sea considerable. En el primer caso se habla de la estabilidad angular ante pequeños disturbios y en el segundo de la estabilidad transitoria.

En el caso de la estabilidad ante pequeños disturbios, la inestabilidad puede darse bien por falta de par sincronizante, o bien por falta de amortiguamiento en las oscilaciones siguientes. En los sistemas actuales el principal problema esta asociado a la escasez de amortiguamiento, dando lugar a dos tipos de oscilaciones [1].

Las modos de oscilación interárea son asociados a la oscilación de máquinas de una zona del sistema contra otro grupo de máquinas en otra zona, las cuales se encuentran típicamente entre



0.2 a 1 Hz. Los modos de oscilaciones locales están asociados a la oscilación de una máquina con respecto al resto del sistema las frecuencias se encuentran típicamente entre 1 a 2 Hz [13, 17].

De los modelos antes mencionados se obtiene un sistema de ecuaciones de la siguiente forma:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (3.27)$$

Dado el limitado rango de operación, un sistema no lineal puede ser representado matemáticamente como sistema lineal, es decir, dicho sistema puede ser linealizado [1,22,36].

Si al sistema de la ecuación (3.27), se le aplica una perturbación, este se representa como la ecuación (3.28).

$$x = x_0 + \Delta x \quad u = u_0 + \Delta u \quad (3.28)$$

Donde Δ es una pequeña perturbación.

Como las magnitudes de las perturbaciones aplicadas al sistema son pequeñas; en las funciones no lineales $f(x, u)$, se pueden expresar en términos de la expansión de Series de Taylor, en función de derivadas parciales que son analizadas alrededor de un punto de operación dado, despreciando los términos de mayor orden[1], y expresando estos términos en forma lineal, se obtiene [1].

Para este análisis se considera el sistema lineal o linealizado, del cual se obtiene, la respuesta que se debe obtener en cada modelo para el desarrollo del análisis ante pequeños disturbios se muestra en la ecuación (3.30), conocida como *respuesta natural o libre del sistema*; la cual representa la respuesta a las condiciones iniciales cuando no existe una fuerza externa de control, en este caso cuando el vector $\bar{U} = 0$, se puede expresar como la ecuación (3.29)



[1,22,36] . Por lo tanto, la descripción matemática del sistema se da en variables de estado (3.29):

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta \bar{U} \quad (3.29)$$

donde:

ΔX = Vector de estados de orden n .

A = Matriz característica del sistema de orden $n \times n$.

B = Matriz de Estradas del Sistema de orden $n \times r$.

$\Delta \bar{U}$ = Vector de control de entradas de orden r .

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x \quad (3.30)$$

3.11.2.1 Eigenvalores.

Con la obtención de los valores propios de la matriz $[A]$, llamados también *eigenvalores*, siendo definidos como un parámetro escalar denominado λ , para el cual existe una solución no trivial, que satisfaga la siguiente ecuación:

$$A\Phi = \lambda\Phi \quad (3.31)$$

donde:

A = matriz característica del sistema de $n \times n$.

Φ = Vector de $n \times 1$.

La representación de los eigenvalores de la matriz $[A]$, de la ecuación (3.31), se escribe como:

$$(A - \lambda I)\Phi = 0 \quad (3.32)$$

Donde I , es la matriz identidad en la ecuación (3.32) y para una solución no trivial, la expresión es:

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (3.33)$$



Si el sistema es de orden n , existirán n soluciones de λ ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$), para esa matriz conocidos como eigenvalores de $[\mathbf{A}]$. Los eigenvalores obtenidos de la matriz $[\mathbf{A}]$, pueden ser representados de manera real o compleja; aunque cuando llegan a ser complejos siempre se presentan en pares conjugados. En algunos sistemas los eigenvalores obtenidos son idénticos, debido a la información obtenida por la matriz $[\mathbf{A}]$, pero se puede demostrar que los eigenvalores de la matriz $[\mathbf{A}]$ y de su transpuesta son los mismos.

3.11.2.2 Eigenvectores.

Para cualquier eigenvalor λ_i , asociado con la matriz $[\mathbf{A}]$, le corresponde un vector φ_i , diferente de cero que satisfagan la ecuación (3.31), conocido como *eigenvector derecho*, teniendo:

$$\mathbf{A}\varphi_i = \lambda_i \varphi_i \quad (3.34)$$

cuando $i=1, 2, \dots, n$

Representando al *eigenvector derecho* Φ_i , como:

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} \varphi_{1i} \\ \varphi_{2i} \\ \vdots \\ \varphi_{ni} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Si la ecuación (3.32), es homogénea; entonces el producto de $k\varphi_i$ (donde k es escalar), es considerado como una solución del sistema; de manera similar, el vector de n -filas ψ_i , también satisface a la ecuación (3.32), teniendo:

$$\Psi_i \mathbf{A} = \lambda_i \Psi_i \quad (3.36)$$

donde $i=1, 2, \dots, n$

Por lo que es llamado *eigenvector izquierdo* que a su vez se encuentran asociados con los eigenvalores λ_i de la matriz $[\mathbf{A}]$.



Los *eigenvectores derechos e izquierdos* corresponden a diferentes eigenvalores de la matriz $[A]$, estos son ortogonales, lo cual quiere decir que los eigenvalores λ_i no son iguales a los eigenvalores λ_j , teniendo:

$$\Psi_j \varphi_i = 0 \quad (3.37)$$

Pero, para el caso de que los eigenvectores sean correspondientes al mismo eigenvalor, donde C_i es una constante diferente de cero, teniendo:

$$\Psi_j \varphi_i = C_i \quad (3.38)$$

Normalizando a estos eigenvectores de la matriz $[A]$, se tiene:

$$\Psi_j \varphi_i = 1 \quad (3.39)$$

Matrices Modales.

La representación en forma compacta los eigenvectores derechos Φ_i y eigenvectores izquierdos Ψ_i , de matriz $[A]$, se expresa como:

$$\Phi = [\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \cdots \quad \varphi_n] \quad (3.40)$$

$$\Psi = [\psi_1^T \quad \psi_2^T \quad \cdots \quad \psi_n^T]^T \quad (3.41)$$

$[\Lambda]^T =$ Matriz diagonal con los eigenvalores

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, como elementos en diagonal.

Considerando que cada matriz es de orden $n \times n$, entonces las ecuaciones (3.29) y (3.39), se expresan como:

$$A\Phi = \Phi\Lambda \quad (3.42)$$

$$\Psi\Phi = I \quad (3.43)$$

$$\Psi = \Phi^{-1}$$



De modo que la ecuación (3.37), se exprese como:

$$\Phi^{-1}A\Phi=\Lambda \quad (3.44)$$

De esta manera, la respuesta libre depende de tres factores principales que son:

- Los eigenvalores que determinan la razón de aumento o decremento de la respuesta.
- Los eigenvectores que determinan la forma de la respuesta.
- Condiciones iniciales que determinan el grado en que cada modo participa en la respuesta libre del sistema.

En el capítulo 4 se puede observar los eigenvalores en forma rectangular donde la *componente real del eigenvalor* corresponde al *amortiguamiento* (α) de ese modo, mientras que la *componente imaginaria* corresponde a la *frecuencia natural de oscilación del sistema* (ω), de tal manera que la representación de un eigenvalor en función de su amortiguamiento y frecuencia es representado en la ecuación (3.45); donde la *frecuencia de oscilación amortiguada* se expresa en Hertz, por medio de la ecuación (3.27), [1, 22, 36].

$$\lambda=\alpha\pm j\omega \quad (3.45)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3.46)$$

Y la *razón de amortiguamiento* se representa con la ecuación (3.47), indicando la *razón del decaimiento de la amplitud de la oscilación del eigenvalor*.

$$\zeta = \frac{-\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} \quad (3.47)$$

Esta expresión es directamente relacionada con el comportamiento de estabilidad del sistema, debido a que el amortiguamiento es negativo, independientemente del valor de la frecuencia



de oscilación, como se observa en la variable de la velocidad; o bien obteniendo tanto la parte real como imaginaria de manera conjugada como se observa en las demás formas modales. Los eigenvalores se pueden obtener de la matriz característica obteniendo los siguientes comportamientos o casos [1,21, 22]:

- *Eigenvalores sólo con parte real*, representan a un modo no oscilatorio en el sistema, de tal manera que el sistema es asintóticamente estable; esto quiere decir que el sistema tiende a amortiguarse.
- *Eigenvalores con parte real negativa*, representan un modo decayendo.
- *Eigenvalores con parte real positiva*, representa inestabilidad no periódica de tal manera que es inestable, lo cual quiere decir que el sistema nunca se amortigua.
- *Eigenvalores complejos*, se representan en pares conjugados, donde cada par corresponde a un modo oscilatorio.
- *Eigenvalores carecen de parte real* (son cero), se dice que el sistema es críticamente estable o críticamente inestable.

3.11.3 LINEALIZACIÓN

El modelo lineal por series de Taylor del SMBI con una constante de amortiguamiento de $K_D=10$, del cual obtenemos la matriz característica siguiente [1].

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.43 & 0.108 \\ 377 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \end{bmatrix}$$



Otra forma de obtener la matriz de estado puede hacerse directamente de un modelo de simulación no lineal por perturbaciones en cada estado en turno, por pequeñas cantidades y encontrando la relación correspondiente de cambio en todos los estados, esta relación dividida por la perturbación da la columna de la matriz de estado correspondiente al estado perturbado. (Las perturbaciones deben ser pequeñas) y requieren al menos cálculos de doble precisión (operación normal en MATLAB) [17, 23]. El programa de simulación utilizado fue realizado en MATLAB

De acuerdo a [23,25] la linealización directa es de la siguiente forma:

$$\dot{x} = f(x, u, v) \quad (3.48)$$

$$v = g(x, u, v) \quad (3.49)$$

Sea x^0 es un vector x en condición de equilibrio, esto es, $\frac{dx}{dt}$ es cero cuando se evalúa en $x = x^0$, Ahora sea x^j un vector en el cual todos los elementos excepto el jésimo son idénticos a los de x^0 , y en el jésimo difiere del valor correspondiente Δx^j . Entonces, si Δx^j es suficientemente pequeño, los jésimos columna. De A y H se pueden calcular o estimar de:

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)^j - \left(\frac{dx}{dt}\right)^0 = A_j \Delta x^j \quad (3.50)$$

$$v^j - v^0 = H_j \Delta x^j \quad (3.51)$$

Donde $\left(\frac{dx}{dt}\right)^0$ y $\left(\frac{dx}{dt}\right)^j$ se calculan de la ecuación (3.48) usando x^0 y x^j ; v^j y v^0 son las salidas calculadas en base a x^0 y x^j ; A^j y H_j son las jésimas columnas de A y H. Las columnas de B y F. Son estimadas de la misma forma calculando $\left(\frac{dx}{dt}\right)$ y v con elementos perturbados individualmente en el vector de entrada u .



$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \omega &= \frac{1}{2H} (P_m - P_e - K_D \Delta \omega_r) \\ \frac{d}{dt} \omega &= \frac{1}{2(3.5)} (0.9 - 0.9 - 10(1 + 0.0001 - 1)) = \frac{1.43 X^{-4}}{0.0001} = 1.43 \\ \frac{d}{dt} \delta &= \omega_0 \Delta \omega_r \\ \frac{d}{dt} \delta &= 377(1 + 0.0001 - 1) = \frac{377 X^{-4}}{0.0001} = 377 \\ \frac{d}{dt} \omega &= \frac{1}{2(3.5)} (0.9 - P_e - 10(1 - 1)) = \frac{-0.1088 X^{-4}}{0.0001} = -0.1088\end{aligned}$$

Donde P_e es:

$$P_e = \frac{E_l E_B}{X_T} \left[(\text{sen} \delta * \cos(0,001)) + (\text{con} \delta * \text{sen}(0,001)) \right]$$

La matriz característica es:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.43 & 0.1088 \\ 377 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \end{bmatrix}$$

Esta técnica es satisfactoria debido a que los resultados son muy aproximados a los obtenidos por medio de series de Taylor.

3.11.4 FORMAS MODALES

La respuesta libre del sistema, se representa en función de sus eigenvalores y eigenvectores que se expresan de tal manera, que pueden identificar sus formas modales, y no es más que la combinación de eigenvalores con sus respectivos eigenvectores (3.52), [1, 21].

$$\Delta X_i(t) = \varphi_{1i} C_1 e^{\lambda_1 t} + \varphi_{2i} C_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + \varphi_{ni} C_n e^{\lambda_n t} \quad (3.52)$$

donde:

φ_{ki} = Elemento de renglón k ésimo y la columna i ésima de la matriz modal Φ . Entrada k ésima de Φ_i .



C_k = constante diferente de cero, del producto del eigenvector izquierdo k ésimo y el eigenvector derecho k ésimo correspondientes al k ésimo eigenvalor.

El elemento $\Delta X_k(t)$ es llamado k ésimo modo. Donde ϕ_{ki} mide la actividad en el modo y el eigenvector izquierdo muestra la contribución de esta actividad en el modo.

La forma del modo, esta dada por el comportamiento del eigenvector derecho incluso cuando un modo es excitado, este nos da la actividad relativa de las variables de estado involucradas.

Si en la ecuación (3.52), se calcula el valor de los ángulos para cada forma modal, estos nos van a proporcionar los desplazamientos de fase para cada una de las variables de estado con respecto al modo de análisis.

3.11.5 FACTORES DE PARTICIPACIÓN

La finalidad de obtener el eigenvector izquierdo del eigenvalor correspondiente, nos ayuda a identificar la combinación de las variables de estado originales, que son mostradas en el modo en cuestión. La participación de los modos del sistema en la formación de la respuesta en el tiempo, puede obtenerse por la interpolación de la ecuación de la respuesta de los estados del sistema. Por medio de una matriz de participación [P], la cual combina eigenvectores derechos y eigenvectores izquierdos de cada modo del sistema (3.54), las cuales son cantidades complejas adimensionales que proporcionan información sobre el comportamiento de un sistema dinámico [1, 21].

$$P = [p_1 \quad p_2 \quad \cdots \quad p_n] \quad (3.53)$$



Para un sistema de orden n , la matriz de participación es:

$$P = \begin{bmatrix} \varphi_{1i}\psi_{i1} \\ \varphi_{2i}\psi_{i2} \\ \vdots \\ \varphi_{ni}\psi_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{12} & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{1i} \\ p_{2i} \\ \vdots \\ p_{ni} \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

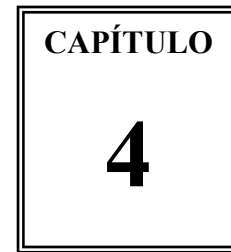
donde:

φ_{ki} = Elemento de renglón k ésimo y la columna i ésima de la matriz modal Φ . Entrada k ésima de Φ_i .

ψ_{ik} = Elemento de renglón i ésimo y la columna k ésima de la matriz modal Ψ . Entrada k ésima de Ψ_i .

El elemento $p_{ki} = \varphi_{ki}\psi_{ik}$ es llamado factor de participación. Definido como una medida de la participación relativa de la k ésima variable de estado en el k ésimo modo y viceversa. Donde φ_{ki} mide la actividad en el modo y la ψ_{ik} muestra la contribución de esta actividad en el modo

APLICACIÓN Y RESULTADOS



4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se muestran las pruebas realizadas a los diferentes sistemas y se analizan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas. La simulación se realizó mediante el uso de un programa realizado en MATLAB por Graham Rogers y los resultados fueron validados con el paquete comercial PSS/E, el cual está formado por un conjunto de modelos para la simulación de sistemas eléctricos en condiciones de régimen dinámico. Así, permite realizar análisis de estabilidad angular ante pequeños disturbios.

Se reportan los resultados de varias simulaciones obtenidas a los tres sistemas de prueba, cada uno de los cuales presentan diferentes características, complejidad y grado de detalle en el modelo de sus componentes.

El primer sistema de prueba es el sistema máquina bus infinito (SMBI) [1]; en el apéndice B se reportan los estudios de estabilidad. El segundo sistema de prueba es el de dos áreas [1], y a este se le aplican una serie de pequeñas perturbaciones a la potencia mecánica de los generadores; además, al sistema Nueva Inglaterra, se le realizaron pruebas bajo la influencia de multienlaces de HVDC en nodos de baja robustez

4.2 Descripción del sistema de estudio máquina bus infinito

El sistema de prueba analizado es el máquina bus infinito, mostrado en el diagrama unifilar en la Figura 4.1 [1, 24]. En el apéndice B se presentan los parámetros del sistema necesarios para realizar un estudio de estabilidad angular ante pequeños disturbios.

En este sistema se analiza la influencia que tiene el enlace de HVDC en las variables de estado electromecánicas. El desarrollo del análisis de estabilidad ante pequeños disturbios se hace con un programa en MATLAB, (Graham Rogers) éste fue modificado para obtener los resultados del análisis de estabilidad. Así como también, el paquete del PSS/E se utilizó para verificar y comparar los resultados del análisis modal obtenido en MATLAB.

En la Tabla 4.1, se presentan los resultados obtenidos con el programa MATLAB en la cual se muestra el comportamiento de las oscilaciones electromecánicas.

4.2.1 Caso de estudio

Se realiza la estabilidad ante pequeños disturbios con modelo de generador clásico, transitorio y subtransitorio [18].

Caso i) La primera simulación consiste en transmitir el 100% de potencia activa por CA.

Caso ii) La segunda simulación es con un enlace de HVDC a la red del sistema.

Las reactancias de la red de CA se muestran en el apéndice B (Tabla B.2.) están en p.u. con una base de 2220 MVA-24 kV, 60 Hz (referidas al lado BT del transformador). Las condiciones iniciales de operación y valores de la máquina se muestran en el apéndice B.

4.2.2 Resultados del caso de estudio

Se reportan los eigenvalores obtenidos al considerar los diferentes casos, del siguiente sistema .

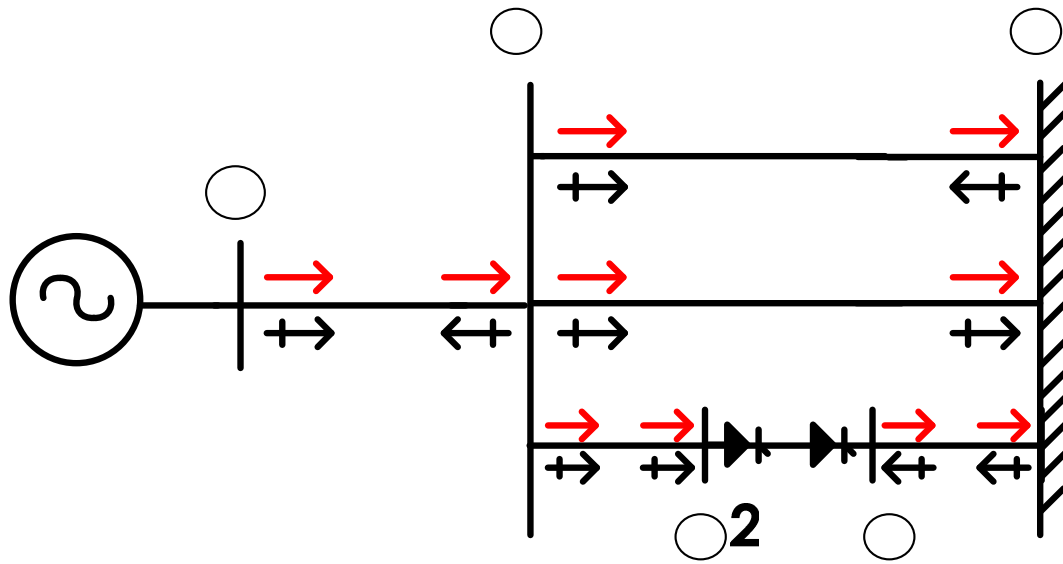


Figura 4.1 Diagrama unifilar del sistema máquina bus infinito.

1.091

1.091

3

TABLA 4.1. Influencia del enlace de HVDC en la estabilidad ante pequeños disturbios considerando los modelos de generador clásico, transitorio y subtransitorio, sin controles en las máquinas.

Modelo del generador	Eigenvalores	Razón de amortiguamiento (G)	Frecuencia de oscilación (f) HZ	Eigenvalores	Razón de amortiguamiento (G)	Frecuencia de oscilación (f) HZ	Estados dominantes
	CA			HVDC			
Clásico	1, 2	37.260817	1.0161	1, 2, 3, 4, 5	0.0341	1.0184	δ_1, ω_1 V_conr V_coni I_dc
	-0.0000±6.3848			-0.4798±6.3345 -0.0302 -2.0881 -72.588			
Transitorio	1, 2, 3, 4	0.0237935	1.0186	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	0.0983	1.0221	δ_2, ω_2 E'_q, -E'_d V_conr V_coni I_dc
	-0.15230±6.4001 -0.05160 0.0000 -2.50390 0.0000			-0.6347±6.4224 -2.4682± -1.0725 -0.0302 -0.1296 -72.3590			
Subtransitorio	1, 2, 3, 4, 5, 6	0.0316622	1.0217	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	0.1045	1.0336	δ_3, ω_3 E''_q, E''_q -E''_d -E''_d V_conr V_coni I_dc
	-0.20340±6.4196 -0.05050 -1.73830 -22.3027 -36.4082			-0.6827±6.4944 -1.9994±0.8670 -0.0302 -0.1402 -22.8166 -38.0609 -66.9258			

En la Tabla 4.1 se muestra el comportamiento de los eigenvalores del generador de los modelos de 2°, 4° y 6° orden, se puede observar, tanto en las columnas 2 y 3 que hay estabilidad en los diferentes modelo de generación, está dado por el valor de los eigenvalores de la matriz característica \bar{A} , los cuales se originan de las raíces del sistema de la ecuación característica, debido a que el amortiguamiento es negativo, independientemente del valor de la frecuencia de oscilación. Se puede decir que al simular la influencia del enlace se tiene mejoras en cuanto al amortiguamiento, se puede ver el efecto del enlace de HVDC en

donde la parte real de los eigenvalores críticos tiende a ser más estable y los que eran estables tienden a ser más estables manteniendo valores similares de frecuencia, (columnas 5 y 6).

4.3 Descripción del sistema de dos áreas

El sistema de dos áreas consta de 13 nodos, 2 líneas de transmisión, 6 transformadores, y 4 generadores, ver diagrama unifilar en la Figura 4.2, en el apéndice B se presentan los parámetros del sistema necesarios para realizar un estudio de estabilidad angular ante pequeños disturbios. A este sistema se le aplican una serie de pequeños disturbios en potencia mecánica a diferentes generadores con la finalidad de poder observar la influencia que tiene el enlace de HVDC en las oscilaciones locales e interárea [4].

4.3.1 Caso de estudio

Los modos de oscilación interárea son asociados a las oscilaciones de máquinas de una zona del sistema, contra otro grupo de máquinas en otra zona, las cuales se encuentran típicamente entre 0.2 a 1 Hz. Los modos de oscilaciones locales están asociados a la oscilación de unas máquinas con respecto al resto del sistema las frecuencias se encuentran típicamente entre 1 a 2 Hz [17, 30, 32].

Caso a) La primera simulación consiste en transmitir el 100% de potencia activa por CA.

Caso b) La segunda simulación consiste en aplicar un enlace de HVDC a la red del sistema.

Caso c) La tercera simulación es con un modelo de carga 70% de corriente constante y, 30% de impedancia constante, caso ocupado en modelo ZIP

Caso d) La cuarta simulación es aplicando un pequeño disturbio a los generadores del area 1, generador 1 y 2 del orden de 0.01 y -0.01 respectivamente.

4.3.2 Resultados obtenidos

Se reportan los eigenvalores obtenidos al considerara los diferentes casos, del siguiente sistema .

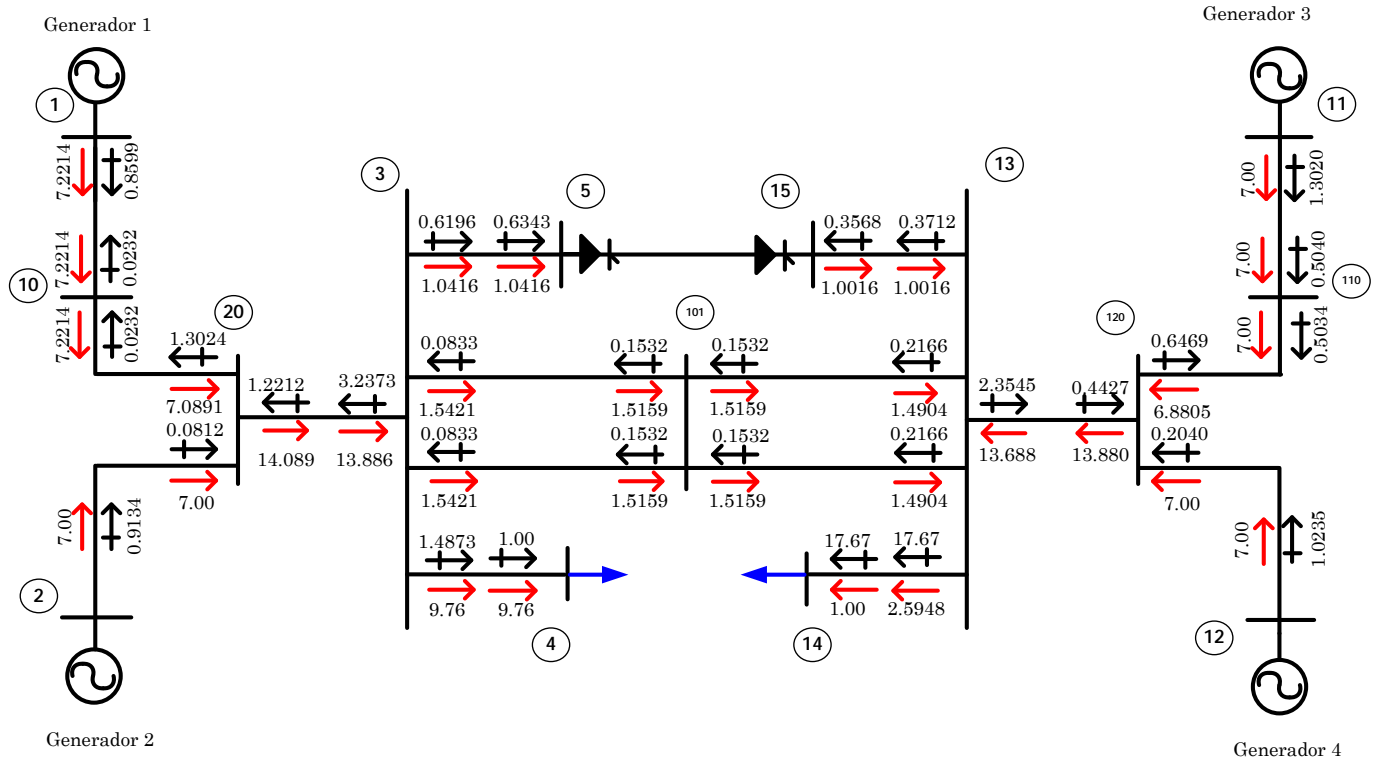


Figura 4.2 Diagrama unifilar del sistema de dos áreas[1]

En la Tabla 4.2 y Tabla 4.3, se muestra el comportamiento de los eigenvalores de los generadores con modelos de 2° y 6° orden, respectivamente[18].

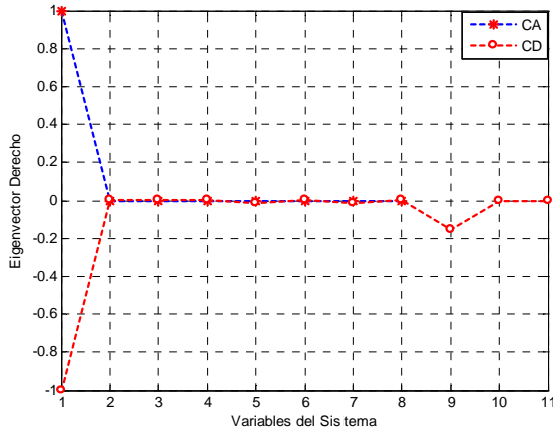
TABLA 4.2. Influencia del enlace de HVDC en la estabilidad ante pequeños disturbios considerando el modelo de generador clásico.

Modelo del generador	Eigenvalores						Estados dominantes
	CA MATLAB	HVDC MATLAB	CA PSS/E	HVDC PSS/E	HVDC 70-30 MATLAB	HVDC 70-30 PSS/E	
Clásico	0.0120	-0.0016± 0.4324i	0.89254E-01	0.17422	-0.57±0.4157i	-0.42±0.4157i	δ_1, ω_1
	-0.0120		-0.89254E-01	-0.17422			
	-0.0000± 3.5324i	-0.0180± 3.6212i	0.13E-08± 3.2944	0.0000±3.4061i	-0.02±3.6902i	-0.00±3.4751i	δ_2, ω_2
	-0.0000± 7.4194i	-0.0021± 7.4264i	0.88E-08± 7.4719	0.0000±7.4834i	-0.00±7.5314i	-0.00±7.4744i	δ_3, ω_3
	-0.0000 ± 7.7135i	-0.0002± 7.7137i	0.78E-08± 7.5467	0.0000±7.5466i	-0.00±7.7100i	-0.00±7.5429i	δ_4, ω_4
		-0.0351			-0.0361		V_{conr}
		-19.0780			-19.079		V_{coni}
		-79.6913			-79.6962		I_{dc}

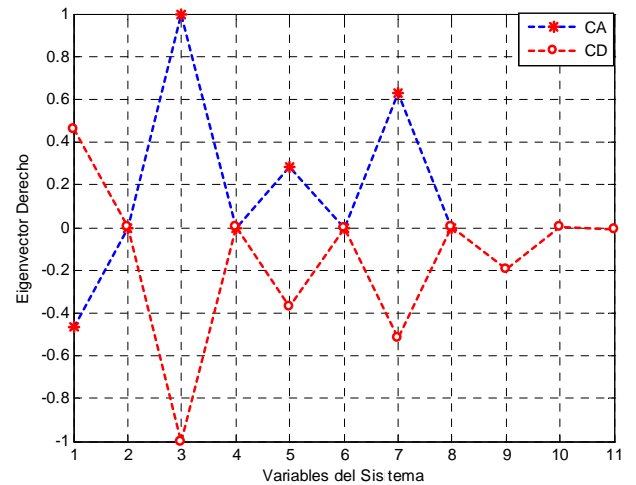
TABLA 4.3. Influencia del enlace de HVDC en la estabilidad ante pequeños disturbios considerando el modelo de generador subtransitorio.

Modelo del generador	Eigenvalores						Estados dominantes
	CA MATLAB	HVDC MATLAB	CA PSS/E	HVDC PSS/E	HVDC 70-30 MATLAB	HVDC 70-30 PSS/E	
<i>Subtransitorio</i>	-0.0195 0.0216 -0.1159±3.4690i -0.5110±6.7705i -0.5452±7.0199i	-0.0027±.6401i -0.0956±3.5625i -0.5175±6.7759i -0.5449±7.0207i -0.0780 -17.9485 -76.9863	0.46525 -0.41941 -0.19269±2.1161i -0.52334±6.2397i -0.6792±7.1718i	-0.46498±0.61E-01i -0.16223±3.3677i -0.67281±7.2079i -0.62012±7.4199i	-0.62876±0.1544i -0.17798±3.56232i -0.68455±7.8915i -0.63592±7.4539i -0.1235 -21.782 -82.9174	-0.62858±0.1544i -0.17798±3.4232i -0.68277±7.1905i -0.60859±7.3139i	δ_1, ω_1 δ_2, ω_2 δ_3, ω_3 δ_4, ω_4 V_{conr} V_{coni} I_{dc}

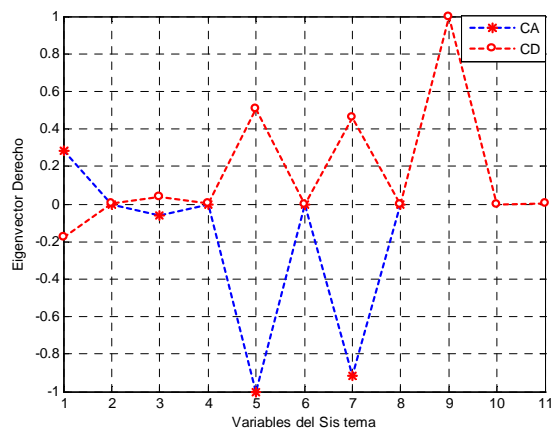
A continuación se muestran los comportamientos de manera gráfica de las formas modales en función de los eigenvectores derechos Figura 4.3, del modelo clásico.



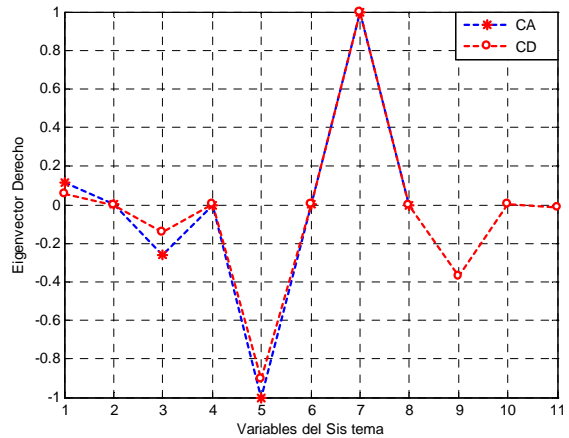
Eigenvectores de los modos 1y 2.



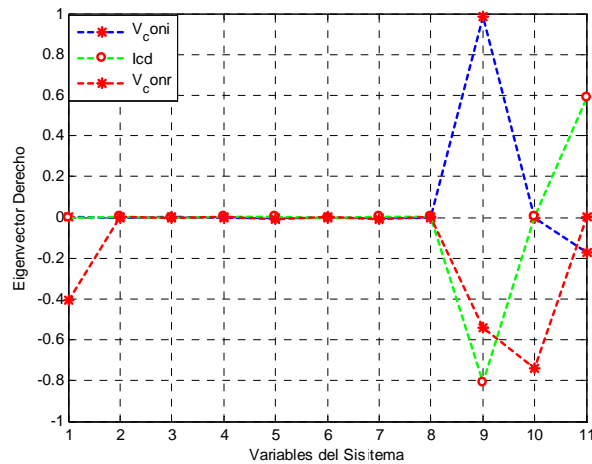
Eigenvectores de los modos 5y 6.



Eigenvectores de los modos 3y 4



Eigenvectores de los modos 7y 8.



Eigenvectores de los modos 9, 10 y 11

Figura 4.3 Comportamiento modal en función de los eigenvectores derechos

La Figura 4.3, muestra el comportamiento de los eigenvectores derechos indicando el comportamiento modal de cada variable de estado del sistema de 2° orden en una respuesta natural. Estas gráficas muestran la forma que toman los modos del sistema en función de cada variable de estado, indicando un valor cuantitativo de la actividad relativa que tiene cada variable de estado para cada modo; observando cuando una variable de estado es excitada. Observando que en los once modos del sistema, siempre existe actividad por parte de enlace de HVDC. Haciendo el análisis en el modo 1, hay mayor actividad por parte del ángulo y la velocidad debido a que éste modo representa al eigenvalor complejo conjugado de la variable de estado de ángulo y velocidad del generador 1, se puede decir que mediante el valor de las magnitudes de cada eigenvector derecho, observando cuales son las variables que tienen una mayor actividad en cada modo en todo el sistema, se puede identificar cuales son los eigenvectores derechos que pertenecen a cada eigenvalor del sistema.

También en este mismo modo, el eigenvector derecho que representa a la corriente del enlace de HVDC, es el único que tiene actividad, y esto es recíproco; se observa que el eigenvector derecho que representan la corriente en el enlace, modo 9, tienen una actividad en este modo.

En los modos 3 y 4, es donde existe mayor actividad por parte de la corriente del enlace debido a la relación que tiene con las oscilaciones interáreas.

A continuación se muestran los comportamientos modales en función de los factores de participación del modelo de 9° orden en la figura 6 de seis y ocho polos.

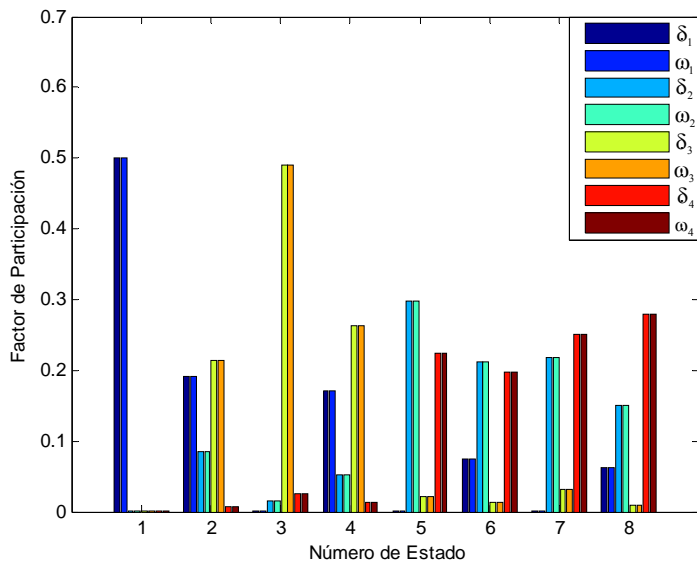


Figura 4.4 Comportamiento modal en función de los factores de participación

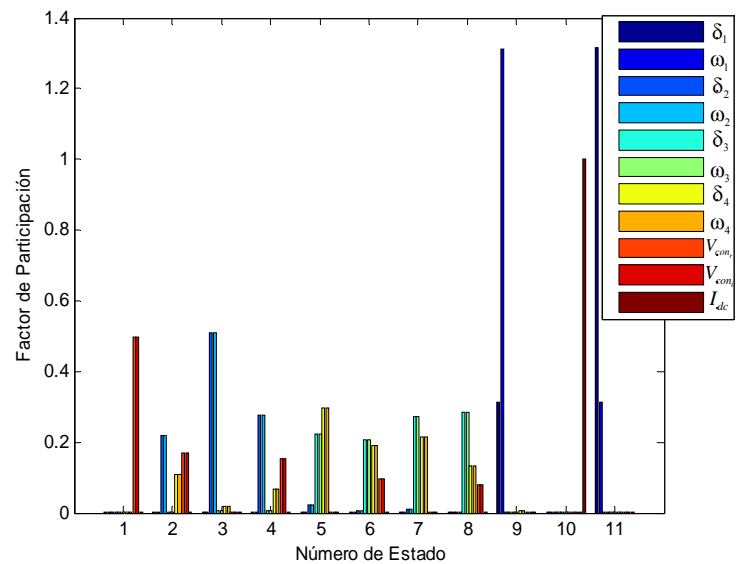


Figura 4.5 Comportamiento modal en función de los factores de participación

Las formas modales que son expuestas anteriormente presentan el comportamiento de las variables involucradas en el modelo de 2° orden donde primeramente podemos observar en las Figuras 4.4 la actividad que tienen las variables de estado cuando se realiza un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios CA, en una condición estables de operación. Posteriormente en las Figuras 4.5 se observa que para los mismos modos del sistema con enlace de HVDC, existe tanto una participación relativa por parte de cada modo en función de sus eigenvectores derechos y que a su vez cada variable de estado contribuye a esta actividad, la cual esta dada en función de la participación que tiene cada variable en este modo de operación estable.

En la Tabla 4.2 en base a las simulaciones que presentan diferentes características con y sin enlace de HVDC, se puede ver el comportamiento dinámico del sistema ante pequeños disturbios está caracterizado por tres modos de interés; dos modos locales con frecuencia del orden de 1.19, 1.2 y un modo interárea con frecuencia de 0.56 Hz.

4.3.3 OSCILACIÓN EN LOS SEP's

Las respuestas de las velocidades de los generadores ante un pequeño disturbio en la potencia mecánica en los generadores 1 y 2 se muestran en la Figura 4.6., la simulación se realizo en el paquete PSS/E. El

cambio en la potencia mecánica en el generador 1 es 0.01 p.u. y en el generador 2 es p.u. este es -0.01. En el área 1, los cambios de la velocidad oscilan en una frecuencia de cerca de 1.2 Hz Figura 4.6 . Los cambios de la velocidad del generador 1 y del generador 2 en esta frecuencia está en contrafase, generador 1 está oscilando contra el generador 2. En el área 2, los generadores oscilan en una frecuencia más baja. En el inicio del disturbio, los generadores se mueven juntos a una frecuencia más baja (0.56 Hz) Figura 4.7. Esto corresponde a la frecuencia del modo del interárea. El modo local del área 2 también se excitado. Está en la misma frecuencia que el modo local en el área 1, pero es 90° en contrafase con este modo [25].

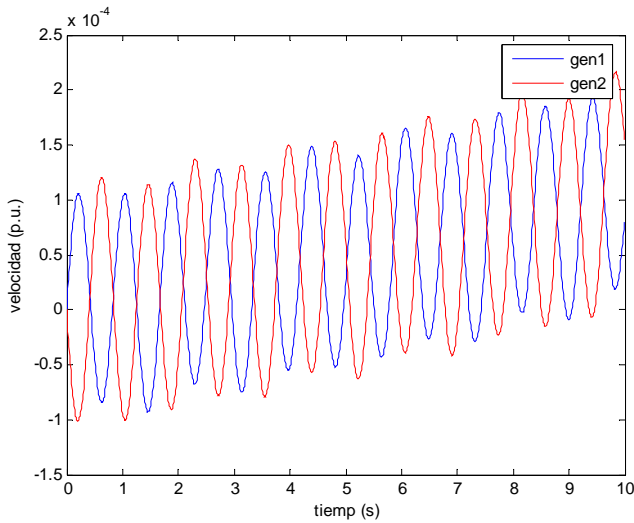


Figura 4.6 Cambio en la velocidad del generador local

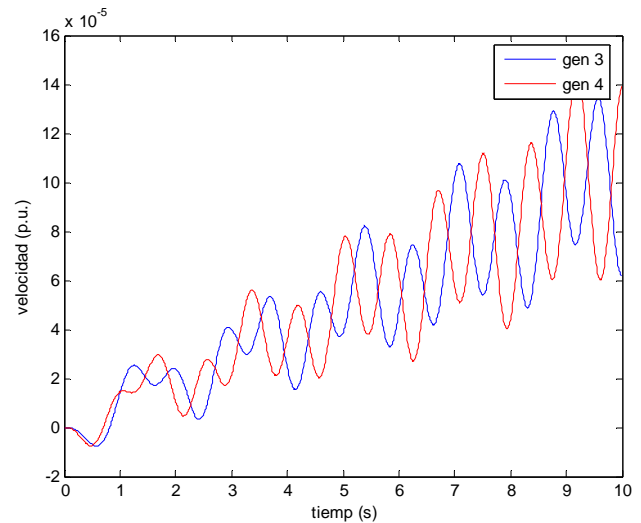


Figura 4.7 Cambio en la velocidad del generador interárea

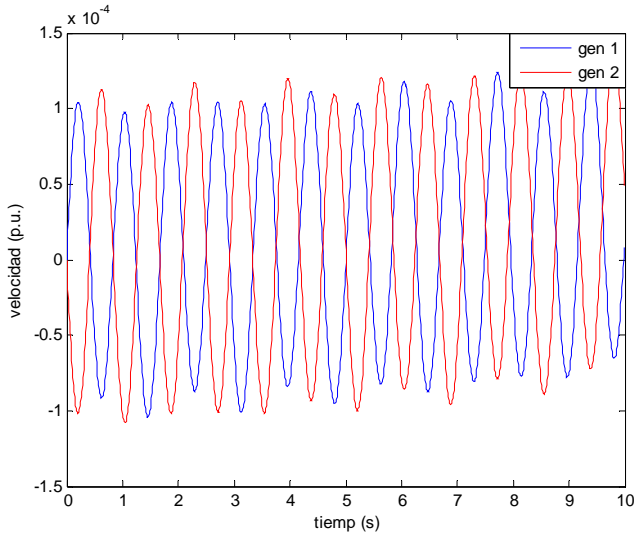


Figura 4.8 Cambio en la velocidad del generador local

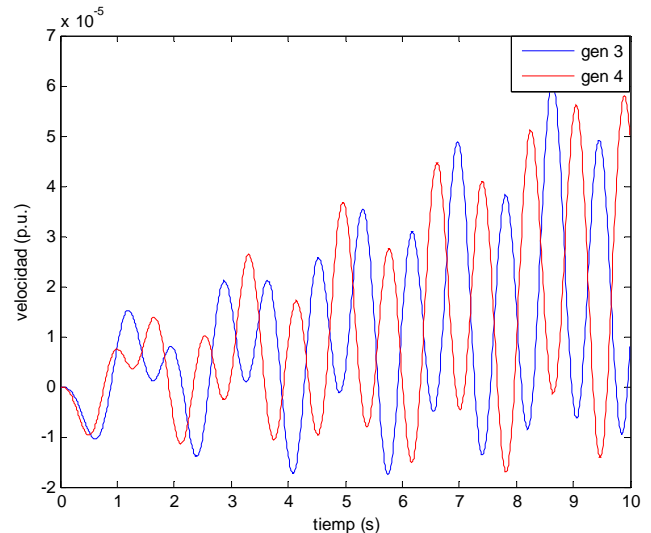


Figura 4.9 Cambio en la velocidad del generador local

Las oscilaciones algunas veces se observan en otras variables del sistema, Figura 4.10 y 4.11, se puede ver las oscilaciones en la magnitud de voltaje en los buses (3 y 13). Estos buses están en terminales del enlace de HVDC. Una vez más uno se puede ver las respuestas de oscilación de modos locales y modos interárea. Puesto que son las frecuencias de los modos locales son más cercanas, no es posible reconocerlos por separado en las respuestas del voltaje en el bus [25].

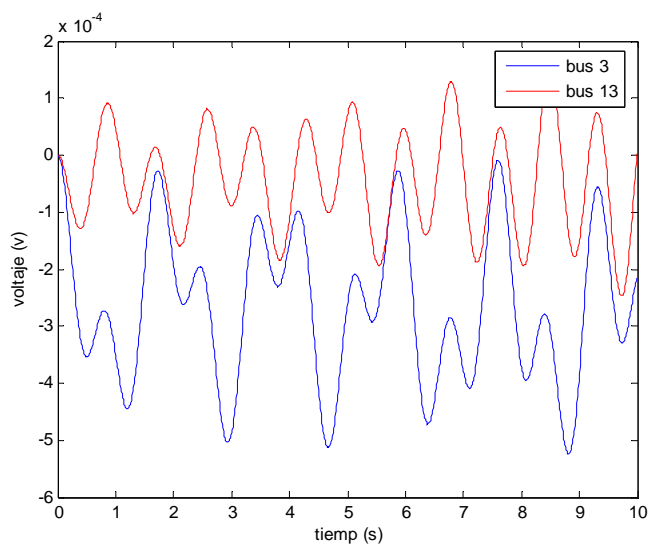


Figura 4.10 Cambio en la magnitud de voltaje de los dos de enlace

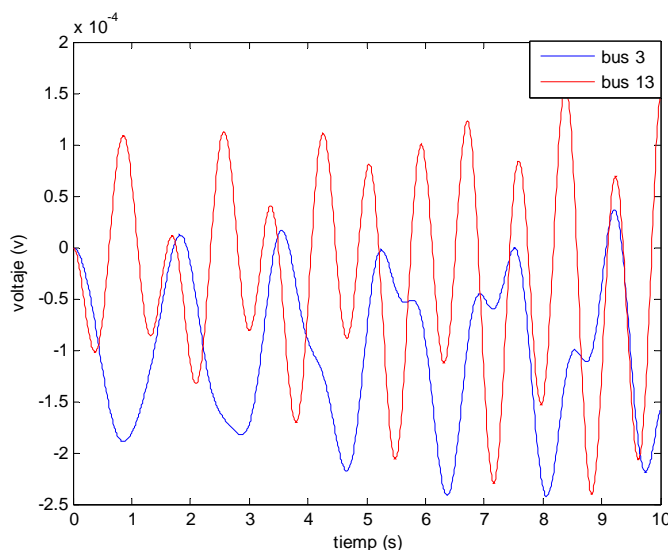


Figura 4.11 Cambio en la magnitud de voltaje de los nodos de enlace

El voltaje en el extremo final (el bus 3) contiene un componente mayor en la frecuencia del modo interárea para los dos disturbios. Con el pequeño disturbio en el área 1, las oscilaciones en el bus de recepción extremo final (bus 13) son más pequeñas en amplitud. Con el disturbio en el área 2, las oscilaciones de recepción en el voltaje de bus del extremo son dominadas por el modo local en el área 2. Para los disturbios en el voltaje del bus más cercano al disturbio es reducido. Esta reducción en voltaje conduce a la reducción en carga eso causa el incremento de la velocidad en los generadores.

4.4 Descripción del sistema Nueva Inglaterra

El sistema de Nueva Inglaterra consta de 39 nodos, 35 líneas de transmisión, 12 transformadores, y 10 generadores (ver diagrama unifilar en la Figura 4.3). En el apéndice B se presentan los parámetros del sistema necesarios para realizar un estudio de estabilidad angular ante pequeños disturbios. A este sistema se le aplican una serie de pequeños disturbios en la potencia mecánica a diferentes generadores con la finalidad de poder observar la influencia que tiene el enlace de HVDC en las oscilaciones locales e interáreas [7, 25, 26].

4.4.1 Caso de estudio y resultados obtenidos

El tercer sistema de prueba es el Nueva Inglaterra, se tomó este sistema para poder analizar la influencia que tiene un sistema multienlace de HVDC en los nodos más débiles del sistema, los cuales se determinan por medio de una función que se desarrolló para determinar la capacidad de corto circuito (por sus siglas en ingles SCC). El calculo del SCC y la relación de corto circuito eficaz (por sus siglas en ingles ESCR) se muestran en el apéndice A; el objetivo es determinar la influencia que tiene el enlace de HVDC en el resultado que arroja la relación de corto circuito, los parámetros de la robustez se muestran en la tabla siguiente [1, 27].

TABLA 4.3 Influencia de la robustez del sistema de CA en los sistemas CA/CD.

Robustez	SCC	ESCR
<i>Alto</i>	Si es mayor que 5	Si es mayor que 3
<i>Moderado</i>	Si está entre 3 y 5	
<i>Bajo</i>	Si es menor que 3	Si es entre 2 y 3
<i>Muy bajo</i>		Si es menor que 2

Clasificación previa de la robustez de los sistemas de CA proporciona un medio preliminar de los problemas de interacción de los sistemas de potencia de CA/CD. Además en el cálculo del SCR el ángulo de la impedancia de Thévenin Z_{Th} , tiene un impacto en la interacción de los sistemas de CA/CD. Se llama “ángulo de amortiguamiento” el cual tiene un impacto importante en la estabilidad de los sistemas de control de CD. Mientras que la carga local resistiva no tiene un efecto significativo en el ESCR, en los sistemas mejora el amortiguamiento [1, 27].

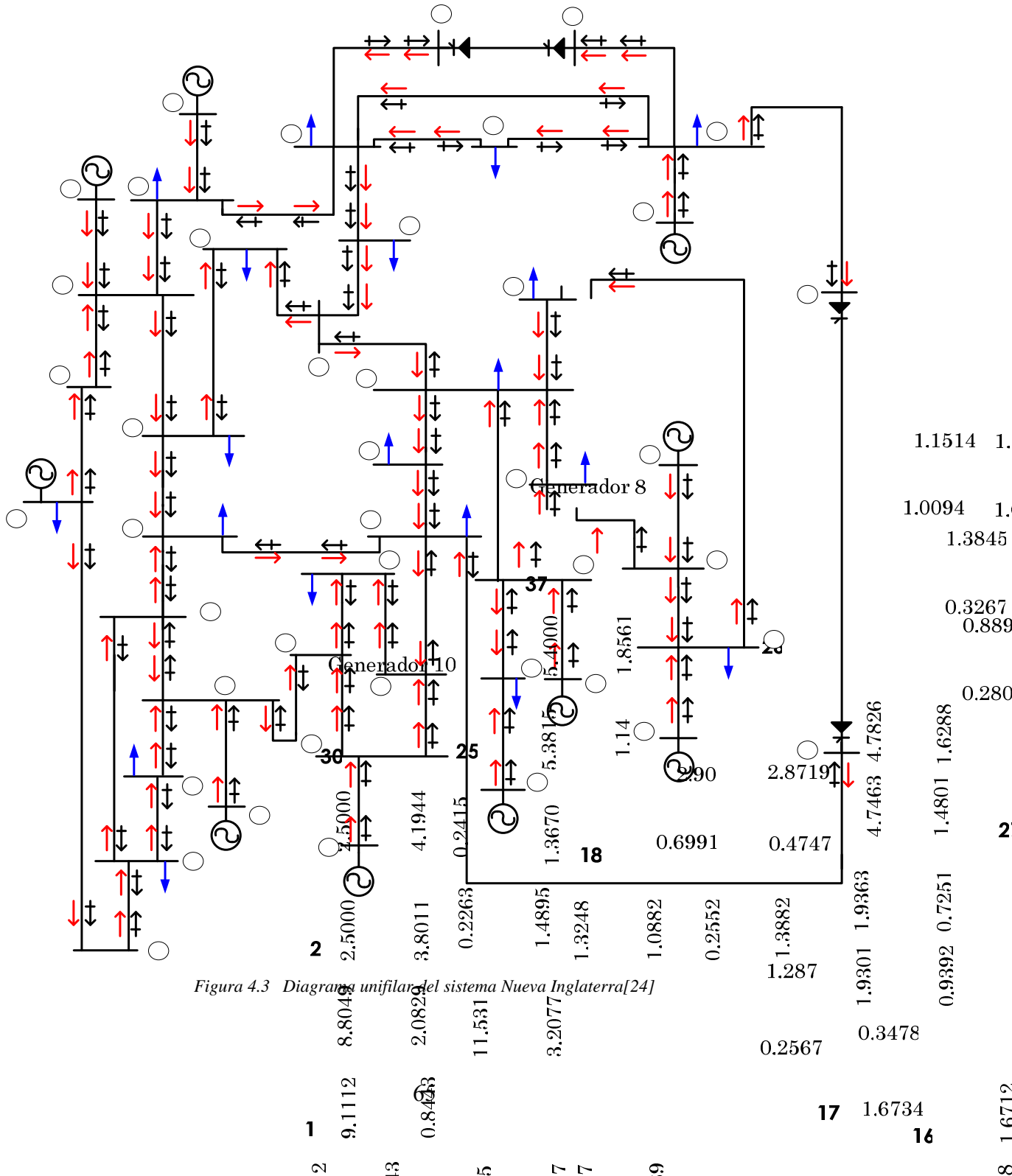
Cada convertidor consume potencia reactiva en puentes convertidores del 50% al 60% de reactivos de la potencia activa transmitida, si $P=1$ p.u. la Q consumida por los convertidores es 0.5 a 0.6 p.u. Para compensar el alto consumo de reactivos, generalmente esto tiene que estar proporcionado del lado de la línea de CA. Parte de la potencia reactiva requerida es proporcionada por los capacitores asociados con el banco de filtros [1, 6, 12, 28].

La manera menos costosa de proporcionar la potencia reactiva es usando la compensación fija. La potencia reactiva varía con la potencia transmitida del lado de CD, los capacitores deben ser proporcionados en tamaños apropiados de bancos cambiables, de modo que el voltaje de CA es constante sostenido en un rango aceptable generalmente de $\pm 5\%$ en todos los niveles de carga. Esto es influenciado también por la robustez de los sistemas de CA. Si los generadores se presentan cerca de las terminales pueden aportar algo de la demanda de potencia reactiva y mantener un voltaje en estado estacionario dentro de un rango aceptable. Para un sistema débil de CA, puede ser necesario proporcionar los reactivos en la forma de un compensador estático de vars (SVCs) o condensadores síncronos [1].

4.4.2 Resultados del caso de estudio

En este caso el enlace multilíneas de HVDC se aplican en los nodos del 29-26 y 29-14, además, se presentan los resultados obtenidos, para el cual se implementó un programa en computadora en MATLAB realizado por el autor Graham Rogers [25].

Se reportan los eigenvalores obtenidos al considerar los diferentes casos, del siguiente sistema.



En la En la Tabla 4.3, se muestra el comportamiento de los eigenvalores del generador 9, se exponen también la razón de amortiguamiento (ζ) y la frecuencia de oscilación para el modelo clásico de la máquina [18].

TABLA 4.3. Influencia del enlace de HVDC en los eigenvalores, razón de amortiguamiento y frecuencia de oscilación en los generadores modelo clásico considerando enlace multiterminal

Modelo del generador	Eigenvalores	Razón de amortiguamiento (ζ)	Frecuencia de oscilación (f) HZ	Eigenvalores	Razón de amortiguamiento (ζ)	Frecuencia de oscilación (f) HZ	Estados
	CA			HVDC			
Clásico	-0.011	1.000	0.000	-0.032	1.000	0.000	δ_1, ω_1
	0.011	1.000	0.000	-0.034	1.000	0.000	δ_2, ω_2
	0.000±3.737i	0.594	0.594	0.085± 3.075i	-0.027	0.489	δ_3, ω_3
	-0.000±5.814i	0.000	0.925	0.037±5.906i	-0.006	0.940	δ_4, ω_4
	0.000±6.338i	0.000	1.008	0.019±6.498i	-0.003	1.034	δ_5, ω_5
	-0.000±7.036i	0.000	1.119	0.001±7.046i	-0.000	1.121	δ_6, ω_6
	-0.000±7.872i	0.000	1.252	0.000±7.776i	-0.000	1.237	δ_7, ω_7
	-0.000±9.123i	0.000	1.452	0.000±9.111i	-0.000	1.450	δ_8, ω_8
	0.000±9.630i	0.000	1.532	0.001±9.696i	-0.000	1.543	δ_9, ω_9
	-0.000±8.001i	0.000	1.273	-0.005±8.116i	0.0005667	1.291	δ_9, ω_9
	-0.000±9.748i	0.000	1.551	0.000±9.737i	-0.000	1.2918	δ_{10}, ω_{10}
				-0.756	1.000	0.000	v_{-conr}
				5.157	1.000	0.000	v_{-coni}
				-60.431	1.000	0.000	l_{dc}
				-1.890	1.000	0.000	v_{-conr}
				-6.582	1.000	0.000	v_{-coni}
			-816.177	1.000	0.000	l_{dc}	

Como se puede observar, en las Tablas 4.3 aumenta la estabilidad en el modo local al incorporar el enlace multiterminal de HVDC en el modelo clásico de máquinas la (columna 6). En esta tabla se puede observar que la segunda columna muestra los eigenvalores en forma rectangular donde la *componente real del eigenvalor* corresponde al *amortiguamiento* (α) de ese modo, mientras que la *componente imaginaria* corresponde a la *frecuencia natural de oscilación del sistema* (ω), de tal manera que la representación de un eigenvalor en función de su amortiguamiento y frecuencia es representado en la ecuación (4.1); donde la *frecuencia de oscilación amortiguada* se expresa en Hz, por medio de la ecuación (4.2).

Cuando se tiene el enlace de HVDC se observa que amortigua las oscilaciones criticas locales lo que provoca que el sistema sea más estable ya que el enlace proporciona un amortiguamiento al sistema véase columna 6.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



5.1 CONCLUSIONES GENERALES

Las conclusiones del análisis de estabilidad ante pequeños disturbios, fué basado en el estudio de la respuesta libre del sistema, por medio de la obtención de los eigenvalores que representan el comportamiento de cada variable de estado en función de su frecuencia de oscilación y amortiguamiento.

Una vez que se definió la respuesta natural, mediante la aplicación de un análisis modal se obtiene la información acerca de cada variable, se ve su comportamiento en función de sus eigenvectores derechos y factores de participación, teniendo como base esta información para la relación que existe entre los estados y los modos.

Observando el comportamiento de las variables de estado que conforman a la máquina síncrona en función de sus características propias, podemos observar la influencia de otros dispositivos que puedan llegar a afectar la estabilidad del sistema, como lo son los enlaces de HVDC o bien el control del enlace.

En los SEP's pueden ocurrir pequeños disturbios que afecten el comportamiento de estos, y aunque se considere una pequeña perturbación, esta fallas pueden llegar a afectar las condiciones de operación de un sistema de potencia y pasar de condiciones normales a un caso de inestabilidad o con tendencia a salir de su estabilidad.

Los resultados que se presentan en el capítulo 4, son resultados de un análisis de estabilidad ante pequeños disturbios con generadores síncronos, en los cuales se emplearon tres sistemas de prueba que a continuación se mencionan.

Las conclusiones de este trabajo se dividen en tres partes:

Se presentan las conclusiones en función del análisis de estabilidad ante pequeños disturbios del generador síncrono del SMBI.

En el segundo sistema se muestran las contribuciones del enlace de CD, que se obtuvieron en las oscilaciones locales e interáreas.

La tercera parte se realizan las sugerencias y recomendaciones para ver la influencia de los enlaces de HVDC en los nodos más débiles de un sistema.

De la prueba al SMBI tomando en cuenta la referencia [1], se comparan los resultados que se obtuvieron con el programa en MATLAB, con el fin de validar los resultados que se dan en la referencia, con los valores de los eigenvalores correspondientes al SEP, esta comparación se realiza con el modelo de 2° orden, obteniendo resultados confiables en cuanto al comportamiento de los eigenvalores del sistema, como se observa en la Tabla 4.1.

Del sistema de prueba de dos áreas [25]. En este sistema, se realizó una simulación donde fue aplicado una pequeña perturbaciones a la potencia mecánica de los generadores, donde se puede observar el impacto que tiene los enlaces de HVDC en las oscilaciones del sistema eléctrico, las oscilaciones en la velocidad de los generadores, que eran crecientes, con el enlace se mantienen dentro de un rango de variación, mientras que en las terminales donde se realiza la interconexión el comportamiento de la magnitud de la tensión, disminuye al mismo tiempo que su frecuencia. Existe relación entre la frecuencia del modelo lineal y no lineal respectivamente. Además se hicieron otras simulaciones con el modelo no lineal aplicando la pequeña perturbación al área 2, obteniendo resultados similares debido a que las características

de las áreas son las mismas [1]. Se analizó el efecto del modelo de carga estática cuando se considera su operación un enlace de HVDC.

Se hace un análisis modal utilizando el modelo lineal de 2° orden, del sistema Nueva Inglaterra comparando los valores del sistema de CA y CD. Se hace un análisis de un sistema que muestra baja robustez lo cual implica que el consumo de reactivos al compensarse por medio de los filtros, el resto de los reactivos deberá hacerse por medio de compensación síncrona, para aumentar la robustez del sistema

5.2. CONTRIBUCIONES.

- Se implementó y mejoró el programa computacional en MATLAB que realiza estabilidad angular ante pequeños disturbios.
- Se utilizó el software PSS/E para la simulación de estabilidad angular ante pequeños disturbios considerando la influencia del enlace de HVDC.
- Sirviendo también para comprobar los resultados obtenidos con el paquete implementado de MATLAB.

5.3. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.

- Desarrollar los modelos de carga dinámica
- Un estudio de estabilidad con sistemas multiterminales en sistema multimáquinas para ver el efecto de los enlaces en el SEP.
- Análisis del efecto de los controles inteligentes en los puentes convertidores.



- Implementación que permita observar las interacciones de los generadores de inducción con enlaces de HVDC y máquinas síncronas.

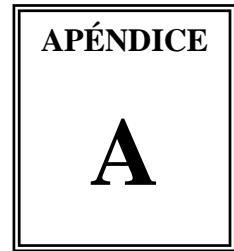
REFERENCIAS

- [1] P. Kundur "*Power System Stability and Control*". Mc. Graw-Hill, New York, 1994.
- [2] M. Klein, G. J. Rogers, S. Moorthy and P. Kundur. "*Analytical Investigation of Factors Influencing Power System Stabilizers Performance*". IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 7, No. 3, pp. 382-390, September 1992.
- [3] <http://www.cfe.gob.mx/es/NegociosConCFE/inversionistas/>
- [4] J. Arrillaga "*High Voltage Direct Current Transmission*". Peter Short Run Press, England, 1983.
- [5] B. J. Cory "*High Voltage Direct Current Convertors and Systems*". Macdonald Trends and Developments in Engineering Series, London
- [6] W. Long and S. Nilsson. "*The Beginning of a New Day Delving into HVDC*". IEEE Power & Energy Magazine, Vol. 5, No. 2 pp. 23-69, March/April 2007.
- [7] J. Arrillaga and B. Smith "*AC-DC Power System Analysis*". Short Run Press, England, 1988.
- [8] B. Zohouri Z., A. Shoulaie. "*A New Simulator for HVdc / ac Systems-Part I*". Turk J Elec Engin, Vol. 11, No. 3, pp. 199-211, 2003.
- [9] B. Zohouri Z., A. Shoulaie. "*A New Simulator for HVdc / ac Systems-Part II*". Turk J Elec Engin, Vol. 11, No. 3, pp. 213-222, 2003.
- [10] Alfredo Nava Segura. "*Transmisión de Energía Eléctrica con Corriente Continua en México Antecedentes, estado actual y perspectivas*" IEEE Sección México, 1980.
- [11] J. Arroyo, A. R. Messina. "*Modelado de sistemas híbridos de CA/CD y su aplicación al control de los sistemas eléctricos de potencia*". Guadalajara Jalisco, julio 2002.
- [12] R. Rudelvall and J. Johnsson. "*Interconexión de Sistemas Eléctricos con HVDC*". Seminario Internacional de Interconexiones Regionales CIGRÉ, Santiago de Chile, November 2003.
- [13] EPRI Report EL-4365. "*Methodology for the Integration of HVDC Links in Large AC Systems - Phase 2: Advanced Concepts*" Prepared by Institut de Recherche d' Hydro-Quebec, April 1987.
- [14] N. Mohan "*Power Electronics*". John Wiley & Sons, United States of America, 2003.
- [15] M. H. Rashid "*Electrónica de Potencia*". Prentice Hall, Tercera Edición, México, 2004.
- [16] J. Arrillaga and N. R. Watson "*Computer Modelling of Electrical Power Systems*". Short Run Press, Second Edition, England, 2001.
- [17] G. J. Rogers. "*Power System Structure and Oscillations*". IEEE Computer Applications in Power, Vol. 12, No. 2, pp. 14-21, April 1999.

- [18] G. Acosta E., *Clasificación y Manejo de los Sistemas Por Unidad en la Modelación de la Máquina Síncrona*, Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación IPN, México, DF, Diciembre 1997.
- [19] D. Ruiz V., *“Efecto de los Modelos de Motores de Inducción en Sistemas Eléctricos de Potencia”* Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación IPN, México, DF, Enero 1996.
- [20] M. C. Ortiz V., *“Simulación de Sistemas Eléctricos de Potencia de CA-CD en Estados Estacionario”* Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación IPN, México, DF, Diciembre 2007.
- [21] M. Lázaro G. *“Análisis de Estabilidad Ante Pequeños Disturbios de los Generadores de Inducción en Sistemas Eléctricos de Potencia”* Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación IPN, México, DF, Mayo 2005.
- [22] D. Olguín S. *“Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia”* Apuntes, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación IPN, México, DF, Diciembre 2002.
- [23] Manual *“Power Technologies, inc”* Version PSS/E-29, made in U.S.A., October 2002.
- [24] J. M. Gallegos L. *Metodo de la Funcion de Energuia Transitoria Aplicado al Estudio de Estabilidad en Sistemas Electricos de Potencia*, Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, Seccion de Estudios de Posgrado e Investigación ESIME, Noviembre 1994.
- [25] G. Rogers *“Power System Oscillation”*. Kluwer Academic Publishers, New York, 2000.
- [26] IEEE Catalog Number 95 TP 101 *“Inter-Area Oscillations in Power Systems”* System Oscillations Working Group, 1a Edición, 1994.
- [27] EPRI Report EL-3004. *“Methodology for the Integration of HVDC Links in Large AC Systems – Phase 1: Reference Manual”* Prepared by Ebasco Services Inc., March 1983.
- [28] M. Klein, G. J. Rogers, S. Moorthy and P. Kundur. *“Analytical Investigation of Factors Influencing Power System Stabilizers Performance”*. System Oscillations Working Group, pp. 3-192, October 1994.
- [29] R. P. Schulz. *“Synchronous Machine Modeling”*. IEEE Symposium on Adequacy and Philosophy of Modeling: Dynamic System Performance, IEEE Publications, 75CH0970-4-PWR, pp. 2428, 1975.
- [30] C. D. Esperilla V., M. C. Ortiz V. y D. Olguín S. *“Análisis de Estabilidad Angular Ante Pequeños Disturbios Considerando la Influencia de un Enlace HVDC en SEP’s”*. Reunión de Verano, RVP-AI/07, IEEE Sección México, Acapulco Gro. Del 8-14 de Julio de 2007.
- [31] M. C. Ortiz V., C. D. Esperilla V. y D. Olguín S. *“Estudio de Flujos de Potencia Incorporando Enlaces de HVDC”*. Reunión de Verano, RVP-AI/07, IEEE Sección México, Acapulco Gro. Del 8-14 de Julio de 2007.

- [32] C. D. Esperilla V., M. C. Ortiz V. y D. Olgúin S. "*La Influencia de un Enlace de HVDC en las Oscilaciones de un sistema Interconectado de Dos Áreas*". 10º Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, IPN-SEPI ESIME, México, D. F. Noviembre 2007.
- [33] M. C. Ortiz V., C. D. Esperilla V. y D. Olgúin S. "*Análisis de Flujos de Potencia*". 10º Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, IPN-SEPI ESIME, México, D. F. Noviembre 2007.
- [34] J. D. Glover and M. S. Sarma "*Sistemas de Potencia Análisis y Diseño*". Thomson, Tercera Edición, México, 2001.
- [35] P. M. Anderson and A. A. Fouad "*Power System Control and Stability*". Science Press, Second Edition, México, 2001.
- [36] G. W. Stagg, and A. H. El-Abiad "*Procesos Transitorios Electromecánicos en los Sistemas Eléctricos de Potencia*". MIR Moscú, 1a Edición, 1988.
- [37] D. O. Salinas, *The Effect of Load Characteristics on Multi-Machine Electric Power System Dynamic Stability*, Tesis para obtener el grado de Doctorado, University of London, Imperial College of Science and Technology, 1979.
- [38] M. I. Zamora B., Á. J. Mazón S., E. Fernández H., K. J. Sangatabeitia B., I. Albizu F., P. Eguía L., E. Torres I. y V. Valverde S. "*Simulación de Sistemas Eléctricos*". Prentice Hall, Madrid, 2005.
- [39] H. Liu, Z. Xu and L. Jin. "*Coordination and Optimization of Small Signal Modulators in Multi-infeed HVDC Systems*". IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Vol. 1, pp. 35-40, September 2003.
- [40] M. C. Ortiz V., "*Simulación de sistemas eléctricos de potencia de CA-CD en estado estacionario*". IPN-SEPI ESIME, México D.F., Diciembre 2007.

RELACION DE CORTO CIRUITO DE UN SISTEMA DE CD



A.1 INTRODUCCIÓN

Los efectos relacionados con el voltaje de las demandas de potencia reactiva de los convertidores depende sobre de las intensidades de los sistemas de CA que proveen a los convertidores. Variación en la carga reactiva producirá muchos mayores problemas de bajo voltaje o alto voltaje en un sistema de CA débil que en un sistema de CA fuerte. Una manera de comparar el grado relativo del problema es comparar la demanda máxima de reactivos del convertidor a la intensidad de corto circuito del sistema de CA. Tales comparaciones son a menudo utilizadas para determinar las magnitudes de oscilación del voltaje.

Cuando los sistemas de HVDC están implicados es costumbre comparar el nivel de corto circuito del sistema de AC al nivel de potencia de DC clasificado, para determinar la relación de corto circuito (SCR). El nivel de potencia de DC lleva una relación de constante razonablemente a la potencia reactiva máxima requerida de los convertidores, tan aproximadamente el SCR es proporcional al recíproco de las oscilaciones calculadas.

La comparación consiste en asegurar de un sistema a otro el estandarizar la capacidad del requiere cortocircuito. La capacidad de corto circuito sobre una base en por unidad (SCC) es el mostrado en la ec. (A.1).

$$SCC = \frac{E_{ac}^2}{X_{th}} \quad (A.1)$$

Aquí E_{ac} es el voltaje de conmutación en el bus la clasificación de potencia de DC y X_{th} es la impedancia equivalente de Thevenin de un sistema de AC. La relación de corto circuito (SCR) entonces determinado por división para la clasificación de potencia ec. (A.2), de CD (P_{dc}):

$$SCR = \frac{E_{ac}^2}{(X_{th} P_{dc})} \quad (A.2)$$

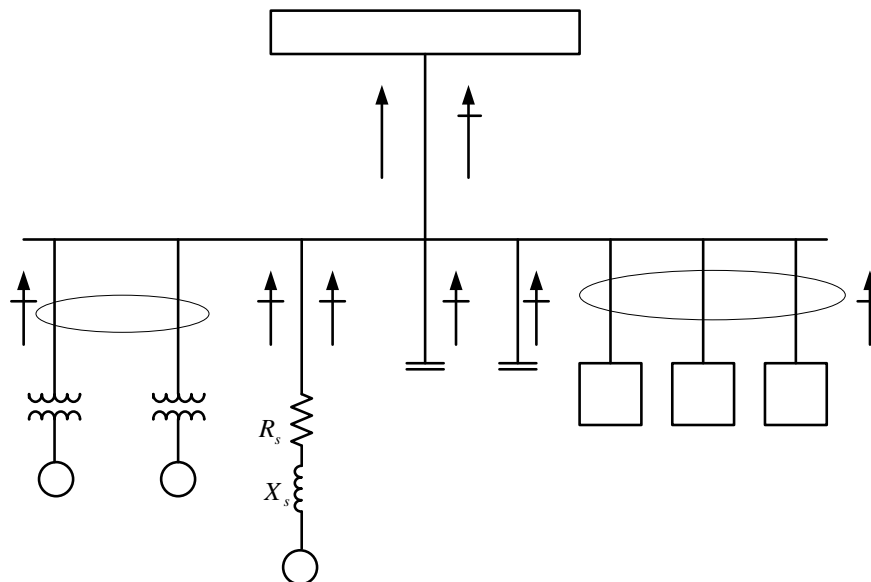
Todas las cantidades están sobre una base común por unidad.

Una definición alternativa de relación de corto circuito es “la magnitud de admitancia del sistema de AC en frecuencia fundamental, expresado en por unidad sobre la clasificación de potencia de DC (1). Esto puede ser demostrado para el equivalente de la definición de la ecuación (A.2) (ver A.2.1).

A.2.1 Ejemplo

Se muestra en el ejemplo de la figura 1, el convertidor (rectificador) con acoplamiento de carga completa, para una potencia en terminales de 1000 MW. Asumiendo que los dos condensadores sincronía regulan el voltaje en el bus en 1.02 p.u. de voltaje de base para limitar la potencia reactiva dibujada de las líneas del sistema de CA a cero. Su salida es de 131.9MVar en el bus del lado de alta. Los condensadores y los filtros estáticos están asumiendo proporcionar 468 MVar adicionales en ese nivel de voltaje. La impedancia del equivalente de Thevenin de las líneas se da directamente como $0.003j + 0.03$ p.u. (base de 100 MVA).

FIGURA A.1. Los flujos de potencia reactiva y real en la terminal típica del convertidor.



$$X_d + X_l = 0.4 \text{ p.u. a } 200\text{MVA}$$

$$R_s = 0.003 \text{ p.u. a } 100\text{MVA}$$

$$X_s = 0.03 \text{ p.u.}$$

La impedancia equivalente de thevenin de los condensadores sincronos es la suma de sus reactancias transitorias y sus impedancias del transformador elevador. Esos se asumen para ser 0.4 por unidad en una base de 200MVA o $0.4 \frac{100P.U.}{200} = 0.2$ sobre una base de 100MVA.

La impedancia en (derivación) o en paralelo equivalente de los filtros y capacitores esta fundamentado por observación esas salidas $\frac{468}{100} = 4.68$ p.u. MVA en 1.02 p.u. de voltaje. Su

impedancia combinada es $X = \frac{E^2}{MVA} = \frac{(1.02)^2}{4.68} = 0.2223$ p.u. (100MVA).

La impedancia equivalente de thevenin de todos estos elementos (líneas, máquinas, condensadores o capacitores) combinados se encuentra como la impedancia de la red considerada del bus de conmutación con todas las fuentes del voltaje puestas en cortocircuito a cero. Así todas las impedancias calculadas parecen estar en paralelo. La impedancia en paralelo de todos los elementos (que descuidan la resistencia de la línea) es:

$$X_{th} = \frac{1}{\frac{1}{0.03} + \frac{1}{0.2} - \frac{1}{0.2223}} = \frac{1}{33.83} = 0.02956 \text{ p.u.} \quad (\text{A.1})$$

$$X_d + X_t = 0.4 \text{ p.u.} \quad a \quad 200MVA \quad (\text{A.1})$$

$$R_s \quad X_s \quad \begin{matrix} R_s = 0.003 \text{ p.u.} \\ X_s = 0.03 \text{ p.u.} \end{matrix} \quad a \quad 100MVA \quad (\text{A.1})$$

Nota: los capacitares y los filtros incrementan la impedancia de Thevenin.

El SCR de los sistemas es

$$SCR = \frac{E_{ac}^2}{(X_{th} P_{dc})} = \frac{(1.02)^2}{((0.02956)(10))} = 3.52$$

PÁRAMETROS DE LOS SISTEMAS DE PRUEBA

APÉNDICE

B

En este apéndice se presentan los datos de los parámetros de las líneas de transmisión y generadores, así como también los resultados del caso base de estudio de flujos de carga obtenidos, correspondiente a los sistemas de prueba utilizados en esta tesis.

B.1 datos del sistema de prueba máquina bus infinito

Los datos para este sistema se presentan en las siguientes tablas:

La tabla B.1 parámetros de las líneas de transmisión, obtenidos de la referencia [1].

La tabla B.2 parámetros del enlace de HVDC [1].

La tabla B.3 parámetros dinámicos y condiciones iniciales de los generadores.

La tabla B.4 condiciones iniciales.

Tabla B.1. Parámetros de líneas de transmisión.

Línea No	Línea Nombre	Nodo		Resist. [p.u.]	React. [p.u.]	Sucept. [p.u.]	Relacion de trans.
		Envío	Recep.				
1	Línea 1	1	3	0.0	0.50	0.00	0.00
2	Línea 2	2	3	0.0	0.15	0.00	0.00
3	Línea 3	3	4	0.0	0.01	0.00	1.14
4	Línea 4	1	5	0.0	0.01	0.00	0.96

Tabla B.2. Parámetros del enlace de HVDC.

Datos	Rectificador	Inversor
Número de nodos	3	1
Reactancia de conmutación	12 Ω	12 Ω
Ganancia del proporcional	1.0	1.0
Ganancia integral	10	1.0
Limite máximo del integral	15	15
Limite mínimo del integral	0	0
Limite mínimo de salida	5	15
Limite máximo de salida	90	90
Control de corriente	1	0
Inductancia de alisamiento	1000 mH	1000 mH
Número de puentes en serie	4	4
Ángulo de control mínimo	$\alpha_{min} = 10.7014^{\circ}$	$\gamma_{min} = 18^{\circ}$
Capacitancia de la línea	0 mF	
Resistencia de la línea CD	20 Ω	
Potencia de la línea de CD	601.4889 MW	
Voltaje de CD	500 kV	
Inductancia de la línea	50 mH	
Voltaje de CD	500 kV	

Tabla B.3. Parámetros dinámicos y condiciones iniciales de los generadores.

Parámetros del generador																
Generador numero	bus	MVA	Xl	Ra	Xd	X'd	X''d	T'do	T''do	Xq	X'q	X''q	T'qo	T''qo	H	K _D
1	2	900	0.20	0.0025	1.8	0.30	0.25	8.00	0.03	1.7	0.55	0.25	0.4	0.05	6.5	0.0
Bus infinito	1	100x ³	0.0	0.0	0.0	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0

Tabla B.4. Condiciones iniciales.

Nodo N ₀	Voltaje (p.u.)	Ángulo grados	P _G (MW)	Q _G (MVar)	P _C (MW)	Q _C (MVar)
1	1.02	00.00	-0.855	0.099	00.00	0.000
2	1.00	25.72	0.900	0.061	00.00	0.000
3	1.00	17.96	0.000	0.026	00.00	0.000
4	1.04	17.95	00.00	00.00	0.271	0.066
5	0.89	0.012	00.00	00.00	-0.225	0.079

C datos del sistema de prueba dos área

Los datos para este sistema se presentan en las siguientes tablas:

La tabla C.1 parámetros de las líneas de transmisión, obtenidos de la referencia [1].

La tabla C.2 parámetros del enlace de HVDC [1].

La tabla C.3 parámetros dinámicos y condiciones iniciales de los generadores.

La tabla C.4 condiciones iniciales.

Tabla C.1. Parámetros de líneas de transmisión.

Línea No	Línea Nombre	Nodo		Resist. [p.u.]	React. [p.u.]	Sucept. [p.u.]	Relación de trans.
		Envío	Recep.				
1	Línea 1	1	10	0.0	0.0167	0.00	0.00
2	Línea 2	2	20	0.0	0.0167	0.00	0.00
3	Línea 3	3	4	0.0	0.005	0.00	0.50
4	Línea 4	3	5	0.0	0.01	0.00	0.478
5	Línea 5	3	20	0.001	0.0100	0.0175	0.00
6	Línea 6	3	101	0.011	0.110	0.1925	0.00
7	Línea 7	3	101	0.011	0.11	0.1925	0.00
8	Línea 8	10	20	0.0025	0.025	0.0437	0.00
9	Línea 9	11	110	0.0	0.0167	0.00	0.00
10	Línea 10	12	120	0.0	0.0167	0.00	0.00
11	Línea11	13	14	0.0	0.005	0.00	0.50
12	Línea12	13	15	0.0	0.01	0.00	0.478
13	Línea13	13	101	0.011	0.1925	0.00	0.00
14	Línea14	13	101	0.011	0.1925	0.00	0.00
15	Línea15	13	120	0.001	0.0175	0.00	0.00
16	Línea16	13	120	0.0025	0.0437	0.00	0.00

Tabla C.2. Parámetros del enlace de HVDC.

Datos	Rectificador	Inversor
Número de nodos	5	15
Reactancia de conmutación	12 Ω	12 Ω
Ganancia del proporcional	1.0	1.0
Ganancia integral	10	1.0
Limite máximo del integral	15	15
Limite mínimo del integral	0	0
Limite mínimo de salida	5	15
Limite máximo de salida	90	90
Control de corriente	1	0
Inductancia de alisamiento	1000 mH	1000 mH
Número de puentes en serie	4	4
Angulo de control mínimo	$\alpha_{\min} = 5^{\circ}$	$\gamma_{\min} = 18^{\circ}$
Capacitancia de la línea	0 mF	
Resistencia de la línea CD	100 Ω	
Potencia de la línea de CD	100 MW	
Voltaje de CD	500 kV	
Inductancia de la línea	50 mH	
Voltaje de CD	500 kV	

Tabla C.3. Parámetros dinámicos y condiciones iniciales de los generadores.

Parámetros del generador																
Generador numero	bus	MVA	Xl	Ra	Xd	X'd	X''d	T'do	T''do	Xq	X'q	X''q	T'qo	T''qo	H	K _D
1	1	900	0.20	0.0025	1.8	0.30	0.25	8.00	0.03	1.7	0.55	0.25	0.4	0.05	6.5	0.0
2	2	900	0.20	0.0025	1.8	0.30	0.25	8.00	0.03	1.7	0.55	0.25	0.4	0.05	6.5	0.0
3	11	900	0.20	0.0 025	1.8	0.30	0.25	8.00	0.03	1.7	0.55	0.25	0.4	0.05	6.17	0.0
4	12	900	0.20	0.0 025	1.8	0.30	0.25	8.00	0.03	1.7	0.55	0.25	0.4	0.05	6.17	0.0

Tabla C.4. Condiciones iniciales.

Nodo No	Voltaje (p.u.)	Ángulo grados	P _G (MW)	Q _G (MVar)	P _C (MW)	Q _C (MVar)
1	1.00	00.00	0.000	0.000	00.00	0.000
2	1.01	00.00	7.000	0.000	00.00	0.000
3	1.00	00.00	0.000	0.000	00.00	0.000
4	1.00	00.00	00.00	00.00	00.00	0.000
5	1.00	00.00	00.00	00.00	9.760	1.000
10	1.00	00.00	0.000	0.000	1.090	0.360
11	1.03	00.00	7.190	0.000	00.00	0.000
12	1.01	00.00	7.000	0.000	00.00	0.000
13	1.00	00.00	00.00	00.00	0.000	0.066
14	1.00	00.00	00.00	00.00	17.67	1.000
15	1.00	00.00	00.00	00.00	-1.01	0.609
20	1.00	00.00	00.00	00.00	00.00	0.000
101	1.00	00.00	00.00	00.00	00.00	0.000
110	1.00	00.00	00.00	00.00	00.00	0.000
120	1.00	00.00	00.00	00.00	00.00	0.000

D. Datos del sistema de prueba Nueva Inglaterra

Los datos para este sistema se presentan en las siguientes tablas:

La tabla D.1 parámetros de las líneas de transmisión, obtenidos de la referencia [1].

La tabla D.2 parámetros del enlace de HVDC [1].

La tabla D.3 parámetros dinámicos y condiciones iniciales de los generadores.

La tabla D.4 condiciones iniciales.

Tabla D.1. Parámetros de líneas de transmisión.

Línea		Nodo		Resist. [p.u.]	React. [p.u.]	Sucept. [p.u.]	Relación de trans.
No	Nombre	Envío	Recep.				
1	Línea 1	1	2	0.0035	0.0411	0.3494	0.0000
2	Línea 2	1	39	0.0010	0.0250	0.3750	0.0000
3	Línea 3	2	3	0.0013	0.0151	0.1286	0.0000
4	Línea 4	2	25	0.0070	0.0086	0.0730	0.0000
5	Línea 5	3	4	0.0013	0.0213	0.1107	0.0000
6	Línea 6	3	18	0.0011	0.0133	0.1069	0.0000
7	Línea 7	4	5	0.0008	0.0128	0.0671	0.0000
8	Línea 8	4	14	0.0008	0.0129	0.0691	0.0000
9	Línea 9	5	6	0.0002	0.0026	0.0217	0.0000
10	Línea 10	5	8	0.0008	0.0112	0.0738	0.0000
11	Línea 11	6	7	0.0006	0.0092	0.0565	0.0000
12	Línea 12	6	11	0.0007	0.0082	0.0695	0.0000
13	Línea 13	7	8	0.0004	0.0046	0.0390	0.0000
14	Línea 14	8	9	0.0023	0.0363	0.1902	0.0000
15	Línea 15	9	39	0.0010	0.0250	0.6000	0.0000
16	Línea 16	10	11	0.0004	0.0043	0.0365	0.0000
17	Línea 17	10	13	0.0004	0.0043	0.0365	0.0000
18	Línea 18	13	14	0.0009	0.0101	0.0862	0.0000
19	Línea 19	14	15	0.0018	0.0217	0.1830	0.0000
20	Línea 20	15	16	0.0009	0.0094	0.0855	0.0000
21	Línea 21	16	17	0.0007	0.0089	0.0671	0.0000
22	Línea 22	16	19	0.0016	0.0195	0.1520	0.0000
23	Línea 23	16	21	0.0008	0.0135	0.1274	0.0000
24	Línea 24	16	24	0.0003	0.0059	0.0340	0.0000
25	Línea 25	17	18	0.0007	0.0082	0.0660	0.0000
26	Línea 26	17	27	0.0013	0.0173	0.1608	0.0000
27	Línea 27	21	22	0.0008	0.0140	0.1283	0.0000
28	Línea 28	22	23	0.0006	0.0096	0.0923	0.0000
29	Línea 29	23	24	0.0022	0.0350	0.1805	0.0000
30	Línea 30	25	26	0.0032	0.0323	0.2556	0.0000
31	Línea 31	26	27	0.0014	0.0147	0.1198	0.0000
32	Línea 32	26	28	0.0043	0.0474	0.3901	0.0000
33	Línea 33	26	29	0.0057	0.0625	0.5145	0.0000
34	Línea 34	28	29	0.0014	0.0151	0.1245	0.0000
35	Transf 1	2	30	0.0000	0.0181	0.0000	1.0250
36	Transf 2	6	31	0.0000	0.0250	0.0000	1.0700
37	Transf 3	10	32	0.0000	0.0200	0.0000	1.0700
38	Transf 4	12	11	0.0016	0.0435	0.0000	1.0060
39	Transf 5	12	13	0.0016	0.0435	0.0000	1.0060
40	Transf 6	19	33	0.0007	0.0142	0.0000	1.0700
41	Transf 7	19	20	0.0007	0.0138	0.0000	1.0600
42	Transf 8	20	34	0.0009	0.0180	0.0000	1.0090
43	Transf 9	22	35	0.0000	0.0143	0.0000	1.0250
44	Transf 10	23	36	0.0005	0.0272	0.0000	1.0000
45	Transf 11	25	37	0.0006	0.0232	0.0000	1.0250
46	Transf 12	29	38	0.0008	0.0156	0.0000	1.0250

Tabla D.2. Parámetros del enlace de HVDC.

Datos	Rectificador	Inversor
Número de nodos	40,43	41,44
Reactancia de conmutación	3 Ω	3 Ω
Ganancia del proporcional	1.0	1.0
Ganancia integral	10	1.0
Limite máximo del integral	15	15
Limite mínimo del integral	0	0
Limite mínimo de salida	5	15
Limite máximo de salida	90	90
Control de corriente	1	0
Inductancia de alisamiento	1000 mH	1000 mH
Número de puentes en serie	4	4
Ángulo de control mínimo	$\alpha_{min} = 5^0$	$\gamma_{min} = 18^0$
Capacitancia de la línea	0 mF	
Resistencia de la línea CD	100 Ω	
Potencia de la línea de CD	100 MW	
Voltaje de CD	500 kV	
Inductancia de la línea	50 mH	
Voltaje de CD	500 kV	

Tabla D.3. Parámetros dinámicos y condiciones iniciales de los generadores.

Parámetros del generador			Condiciones Iniciales		
Número de Generador	H [MW/MVAR]	X'd [p.u.]	P_{m0} [p.u.]	Voltaje Interno	
				E [p.u.]	δ [grados]
1	42.0	0.0310	2.500	1.0932	-0.7296
2	30.3	0.0697	5.732	1.2015	19.7647
3	35.8	0.0531	6.500	1.1514	19.3034
4	38.6	0.0436	6.320	1.0820	16.8321
5	26.0	0.1320	5.080	1.3976	28.8913
6	34.8	0.0500	6.500	1.2246	18.0722
7	26.4	0.0490	5.600	1.1407	19.7798
8	24.3	0.0570	5.400	1.0743	17.3051
9	34.5	0.0570	8.300	1.1389	30.2869
10	500.0	0.0060	10.000	1.0377	-7.9068

Tabla D.4. Condiciones iniciales.

Nodo N ₀	Voltaje (p.u.)	Ángulo grados	P _C (MW)	Q _C (MVar)	P _G (MW)	Q _G (MVar)
1	1.048	-9.616	0.000	0.000	0.00	0.00
2	1.049	-7.063	0.000	0.000	0.00	0.00
3	1.031	-9.907	322.00	2.40	0.00	0.00
4	1.004	-10.702	500.00	184.00	0.00	0.00
5	1.005	-9.514	00.00	0.00	0.00	0.00
6	1.007	-8.812	0.000	0.00	0.00	0.00
7	0.997	-11.015	233.80	84.00	0.00	0.00
8	0.996	-11.519	522.00	176.60	0.00	0.00
9	1.028	-11.344	00.00	0.00	0.00	0.00
10	1.017	-6.425	00.00	0.00	0.00	0.00
11	1.012	-7.241	00.00	0.00	0.00	0.00
12	1.000	-7.257	8.50	88.00	0.00	0.00
13	1.014	-7.143	00.00	0.00	0.00	0.00
14	1.012	-8.813	00.00	0.00	0.00	0.00
15	1.016	-9.229	320.00	153.00	0.00	0.00
16	1.032	-7.829	329.40	32.30	0.00	0.00
17	1.034	-8.823	00.00	0.00	0.00	0.00
18	1.031	-9.662	158.00	30.00	0.00	0.00
19	1.050	-3.200	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.991	-4.614	680.00	103.00	0.00	0.00
21	1.032	-5.421	274.00	115.00	0.00	0.00
22	1.050	-0.971	0.00	0.00	0.00	0.00
23	1.045	-1.173	241.50	84.60	0.00	0.00
24	1.038	-7.708	308.60	-92.20	0.00	0.00
25	1.058	-5.697	224.00	47.20	0.00	0.00
26	1.052	-6.958	139.00	17.00	0.00	0.00
27	1.038	-8.967	281.00	75.50	0.00	0.00
28	1.051	-3.449	206.00	276.00	0.00	0.00
29	1.050	-0.693	283.50	269.00	0.00	0.00
30	1.048	-4.641	0.00	0.00	250.00	146.52
31	0.982	0.000	9.20	460	573.23	207.46
32	0.983	1.570	0.00	0.00	650.00	205.75
33	0.997	2.018	0.00	0.00	632.00	108.65
34	1.012	0.583	0.00	0.00	508.00	166.53
35	1.049	3.990	0.00	0.00	650.00	209.40
36	1.064	6.676	0.00	0.00	560.00	102.16
37	1.028	1.081	0.00	0.00	540.00	0.51
38	1.027	6.367	0.00	0.00	830.00	23.08
39	1.030	-11.10	1104.0	250.00	1000.00	88.49