

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ANALISIS EN ESTADO ESTABLE DE
INTERCONEXIONES SINCRONAS Y
ASINCRONAS OPERANDO EN PARALELO

TESIS

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

PRESENTA

PEDRO MARTIN RUBIO OROZCO

MONTERREY, NUEVO LEON SEPTIEMBRE DE 2003

PMARO

ANALISIS EN ESTADO ESTABLE DE
SISTEMAS ESTADISTAS Y
INTEGRACIONES SINCRONAS Y
ASINCRONAS OPERANDO EN PARALELO

IM

Z5853

.M2

FIME

2003

.R8

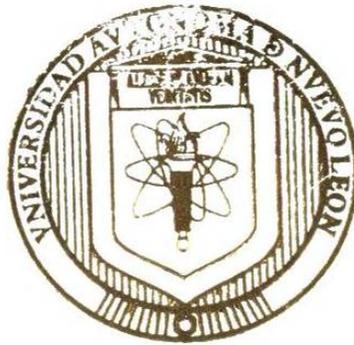


1020149269

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ANALISIS EN ESTADO ESTABLE DE
INTERCONEXIONES SINCRONAS Y
ASINCRONAS OPERANDO EN PARALELO

TESIS

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

PRESENTA

PEDRO MARTIN RUBIO OROZCO

MONTERREY, NUEVO LEÓN SEPTIEMBRE DE 2003

981585

TH
Z 5453
.M2
FIME
2003
.R8

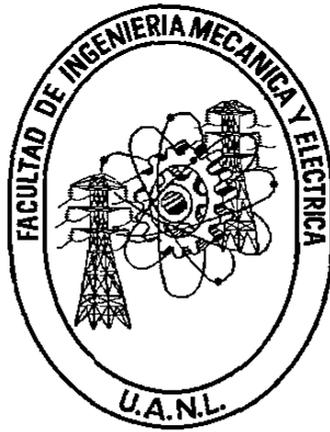


FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ANÁLISIS EN ESTADO ESTABLE DE INTERCONEXIONES SÍNCRONAS Y
ASÍNCRONAS OPERANDO EN PARALELO**

TESIS

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA
CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

PRESENTA

PEDRO MARTÍN RUBIO OROZCO

MONTERREY, N.L.

SEPTIEMBRE DEL 2003

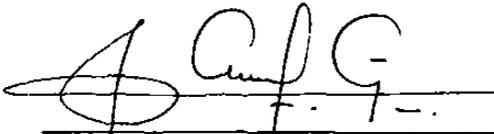
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

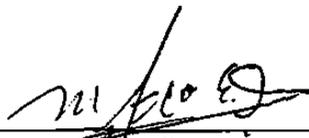
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

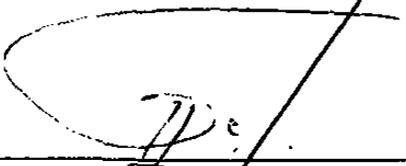
Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **ANÁLISIS EN ESTADO ESTABLE DE INTERCONEXIONES SÍNCRONAS Y ASÍNCRONAS OPERANDO EN PARALELO**, realizada por el Ing. Pedro Martín Rubio Orozco, matrícula 1031919 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Potencia.

El Comité de Tesis


Asesor
Dr. Florencio Aboytes García


Coasesor
Dr. Fernando Sánchez Tello


Coasesor
Dr. Miguel Escalante Gutiérrez


Vo. Bo.
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
División de Estudios de Postgrado

Monterrey, N.L., Septiembre del 2003

Dedico esta Tesis a Dios quien nunca me ha abandonado durante todos estos años, sin Él este trabajo no hubiera sido posible.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a Dios por todo lo que me ha dado en la vida.

A mis padres, Pedro Rubio Montes y Hermila Orozco Rodríguez por todo el apoyo incondicional en todas las decisiones de mi vida y por el amor que nos han dado.

A mi hermano Saúl Rubio Orozco con el cual he compartido tantos años de aprendizaje y crecimiento.

A mis abuelos Pedro Rubio Rentería (Q.E.P.D.) y muy especialmente a Lucila Montes porque llenó mi vida de amor y alegría.

A mis tíos, Carlos (Q.E.P.D.) y a la familia Rubio Romero, Manuel Octavio, Francisca Elvia y a la familia Rueda Rubio. A todos ustedes mil gracias por estar conmigo desde que tengo uso de razón, han sido y serán la parte más importante de mi vida.

A toda la familia Orozco Rodríguez y Rodríguez Rodríguez.

A mis amigos de Hermosillo, Juan Pablo, Rafael, Ivan Rodríguez, Marina, Sergio y a las familias Feria Gómez; Gutiérrez Lizardi; Matuz Soto y Figueroa López. A todos mis amigos de Hermosillo, muchísimas gracias por estar ahí y no olvidarme.

Quiero darle las gracias muy en especial a Verónica Escareño Garza por estar conmigo y darme su apoyo y aliento para la elaboración de esta tesis.

A mis amigos y compañeros del D.I.E. y a toda la raza de Sonora, Michoacán, Puebla y Monterrey que me acompañaron estos años.

Al Dr. Florencio Aboytes por brindarme la oportunidad de aprender de él, por su tiempo y por su paciencia.

A los profesores sinodales, Dr. Fernando Sánchez Tello y Dr. Miguel Francisco Escalante Gutiérrez por el interés mostrados y por sus comentarios.

A los maestros del D.I.E.

Al personal del CENACE.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

RESUMEN

ANÁLISIS EN ESTADO ESTABLE DE INTERCONEXIONES SÍNCRONAS Y ASÍNCRONAS OPERANDO EN PARALELO

Publicación No. _____

Pedro Martín Rubio Orozco, M.C. en Ing. Eléctrica

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Universidad Autónoma de Nuevo León, 2003

Profesor Asesor: Florencio Aboytes García, Ph. D.

El estudio de flujos de potencia es una herramienta básica en la planificación y la operación de los sistemas eléctricos de potencia. La solución del estudio determina el balance de potencia en cada nodo del sistema y permite verificar que los voltajes y flujos de potencia cumplan con límites operativos para garantizar una operación confiable y segura.

En la actualidad es cada vez más frecuente la instalación de dispositivos basados en electrónica de potencia, entre ellos los esquemas para la transmisión de energía en corriente directa, por lo cual existe la necesidad de analizar el comportamiento del sistema eléctrico incluyendo estos dispositivos.

En este trabajo se estudia de manera particular la transmisión en corriente directa de alto voltaje (HVDC), se modelan las estaciones convertidoras y sus controles. El esquema de transmisión en corriente directa (cd) que se presenta es utilizado para la interconexión de sistemas eléctricos operando en corriente alterna (ca). Otro modelo estudiado es el esquema "Back to Back" (BTB), donde se elimina la transmisión en corriente directa pero se retiene el control sobre la potencia activa. El atractivo de esta

opción es la versatilidad para operar como un compensador estático (STATCOM), por lo que se tiene la capacidad de controlar el voltaje en nodos del sistema de ca.

El trabajo aborda de manera detallada la formulación de los estudios de flujos de potencia ca-cd, modelando las estaciones convertidoras HVDC con un algoritmo basado en el método desacoplado rápido (D-R). Una aportación importante del trabajo es el desarrollo de la metodología para incorporar el modelo del esquema BTB utilizando el algoritmo de Newton-Raphson (N-R), en donde se consideran diferentes modos de control.

También se presentan resultados de casos de estudio en las redes de prueba seleccionadas. El análisis incluye casos donde un enlace asíncrono une dos sistemas en ca. Asimismo, casos donde hay enlaces de ca y cd operando en paralelo. El algoritmo que modela el esquema BTB se probó de manera similar, pero se simularon además tres modos de control.

Los algoritmos desarrollados se implantaron utilizando el lenguaje MATLAB®.

ÍNDICE

Resumen.....	iv
Índice de figuras.....	x
Índice de tablas.....	xii
Glosario.....	xiv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. La transmisión en corriente directa en alto voltaje (HVDC).....	1
1.2. El problema de flujos de potencia ca-cd.....	2
1.3. Antecedentes.....	3
1.4. Objetivos y contenido de la tesis.....	4
1.5. Estructura de la tesis.....	4
2. ASPECTOS GENERALES DE LA TRANSMISIÓN EN CORRIENTE DIRECTA.....	7
2.1. Introducción.....	7
2.2. Enlaces de ca y cd de extra alto voltaje.....	7
2.3. Tipos de enlaces de cd.....	10
2.4. Tecnología y componentes de estaciones convertidoras HVDC.....	11
2.5. Limitaciones y ventajas de la transmisión en ca y cd.....	16
2.5.1. Límite de corriente.....	16
2.5.2. Límites de voltaje.....	16
2.5.3. Potencia reactiva y regulación de voltaje.....	17
2.5.4. Estabilidad.....	20
2.5.5. Interruptores de circuitos.....	21
2.5.6. Corriente de corto circuito.....	22
2.5.7. Potencia por conductor y por circuito.....	22
2.5.8. Retorno por tierra.....	24
2.5.9. Equipo de la terminal.....	24
2.5.10. Armónicos.....	24
2.5.11. Unidades generadoras.....	25
2.6. Resumen de ventajas y desventajas de la transmisión de HVDC.....	25
2.6.1. Ventajas.....	25
2.6.2. Desventajas.....	26
2.7. Principales aplicaciones de la transmisión en cd.....	26
2.8. Factores económicos.....	26

ÍNDICE (continuación)

2.9. Resumen.....	27
3. ESTUDIOS DE FLUJOS CA-CD.....	28
3.1. Introducción.....	28
3.2. Método de Newton Raphson.....	28
3.3. Estudios de flujo por el método desacoplado rápido (D-R).....	31
3.4. Criterios de convergencia.....	34
3.5. Formulación del problema ca-cd.....	34
3.6. Modelo del sistema de cd.....	36
3.6.1. Variables del convertidor.....	36
3.6.2. Sistema por unidad cd.....	38
3.6.3. Ecuaciones del sistema de cd.....	39
3.6.4. Incorporación de las ecuaciones de control.....	41
3.6.5. Operación del inversor.....	42
3.7. Técnicas de solución.....	43
3.7.1. Solución unificada.....	43
3.7.2. Consideraciones de programación para los algoritmos unificados.....	46
3.7.3. Método secuencial.....	49
3.8. Resumen.....	51
4. INCORPORACIÓN DEL MODELO DE UN ENLACE ASÍNCRONO BTB EN UN ESTUDIO DE FLUJOS.....	53
4.1. Introducción.....	53
4.2. Modelado de un enlace “Back to Back”.....	53
4.2.1. Modos de control.....	53
4.2.2. Modelo del modo de control de voltaje.....	53
4.2.2.1. Incorporación del BTB.....	56
4.2.3. Modelo del modo de control de voltaje.....	57
4.2.4. Modelo del modo de control STATCOM.....	59
4.2.5. Caso general para la incorporación del modelo del esquema BTB en el problema de flujos de potencia.....	59
4.2.6. Algoritmos para flujos de potencia ca-cd incluyendo el esquema BTB.....	60
4.3. Tolerancia en proceso de convergencia.....	63
4.4. Resumen.....	63

ÍNDICE (continuación)

5. RESULTADOS DE SIMULACIÓN DIGITAL SOBRE DIFERENTES REDES DE PRUEBA.....	64
5.1. Introducción.....	64
5.2. Estudios de flujos ca-cd por el método secuencial.....	65
5.2.1. Resultados en el caso de estudio.....	66
5.2.2. Análisis de resultados.....	71
5.3. Estudios de flujos ca-cd por el método unificado.....	73
5.3.1. Método unificado P-QCD.....	73
5.3.1.1. Resultados.....	73
5.3.2. Método unificado PCD-QCD.....	76
5.3.2.1. Resultados.....	76
5.3.3. Análisis de resultados.....	78
5.4. Estudios de flujos ca-cd incluyendo el esquema BTB.....	79
5.4.1. BTB en paralelo con línea de ca.....	80
5.4.1.1. Modo de control de potencia (MCP).....	80
5.4.1.2. Modo de control de voltaje (MCV).....	82
5.4.1.3. BTB como STATCOM (MCS).....	83
5.4.2. Enlace asíncrono por medio de un BTB.....	84
5.4.2.1. Modo de control de potencia.....	84
5.4.2.2. Modo de control de voltaje.....	86
5.4.2.3. BTB como STATCOM.....	87
5.4.3. Análisis de resultados.....	88
5.5. Resumen.....	89
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	91
6.1. Conclusiones.....	91
6.1.1. Problema de flujos de potencia ca-cd.....	91
6.1.2. Modelo del sistema de cd.....	91
6.1.3. Formulación desarrollada.....	92
6.1.4. Modelado del esquema BTB.....	92
6.1.5. Resultados obtenidos en las simulaciones.....	93
6.2. Aportaciones de la tesis.....	94
6.3. Recomendaciones para trabajos futuros.....	94

ÍNDICE (continuación)

A. MODELADO DE UNA PLANTA CONVERTIDORA CA-CD.....	96
A.1. Introducción.....	97
A.2 Rectificación.....	98
A.3 Inversión.....	103
A.5 Transmisión en cd.....	105
B. LA ESTACIÓN CONVERTIDORA HVDC COMPACTA.....	107
B.1 Características generales.....	108
B.2 Diferencias entre la HVDC compacta y la HVDC clásica.....	109
B.2.1 Rango de potencia.....	109
B.2.2 Modular.....	109
B.2.3 Circuitos convertidores.....	110
B.2.4 Circuitos de estaciones convertidoras.....	110
B.2.5 Independencia con la red de ca.....	110
B.2.6 Función como CEV.....	111
B.3 BTB compacto de Eagle Pass/Piedras Negras.....	111
B.3.1 Enlace BTB de Eagle Pass.....	112
B.3.2 Características del enlace.....	113
B.3.3 Control y protección.....	113
B.3.4 Modos de operación del enlace.....	114
B.3.5 Arreglo de la estación.....	114
C. DATOS DE LAS REDES DE PRUEBA.....	115
C.1. Datos para el enlace asíncrono HVDC.....	116
C.2. Datos del enlace en cd HVDC en paralelo con el enlace en ca.....	117
C.3. Datos de los casos con BTB en paralelo con línea de ca.....	118
C.4. Datos del enlace asíncrono por medio de un BTB.....	118
REFERENCIAS.....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1	Constitución de enlaces de ca y de EAV mostrados por diagramas unificares..... 8
2.2	Tipos de enlaces de cd; (b) monopolar; (c) bipolar; (d) homopolar..... 11
2.3	Estación convertidora HVDC..... 12
3.1	Aproximación lineal de una función de una variable..... 29
3.2	Diagrama de bloques del algoritmo básico de flujos de potencia usando el metodo Newton-Raphson 31
3.3	Diagrama de bloques de flujos de potencia usando el método dasacoplado rápido..... 33
3.4	Convertidor básico de cd (ángulos referidos al sistema de ca)..... 37
3.5	Circuito monofásico equivalente para el convertidor básico (ángulos referidos al sistema de cd).... 37
3.6	Diagrama de bloques del método unificado..... 48
3.7	Diagrama de bloques del método secuencial $P-Q-CD$ 50
4.1	Modelo del BTB..... 54
4.2	Flujo a través del BTB modelado como inyecciones de potencia en los nodos conectados al BTB... 55
4.3	(A) Los nodos A y B pertenecen al mismo sistema, (B) los nodos A y B pertenecen a sistemas aislados entre si..... 55
4.4	Jacobiano de dos áreas aisladas entre si enlazadas por un BTB..... 56
4.5	Jacobiano entre los nodos A y B de un sistema cualquiera o de dos sistemas independientes al unirse por medio de un BTB en modo de control de voltaje..... 58
4.6	Jacobiano incluyendo dos esquemas BTB en el estudio de flujos de potencia..... 60
4.7	Diagrama de bloques para flujos de potencia $ca-cd$ incluyendo el dispositivo BTB como enlace asíncrono en paralelo con enlace síncrono..... 61
4.8	Diagrama de bloques para flujos de potencia $ca-cd$ incluyendo el dispositivo BTB como enlace asíncrono..... 62
5.1	Diagrama de la red 1 para el caso 1. Enlace asíncrono..... 65
5.2	Línea de cd transmitiendo 0 MW..... 66
5.3	Línea de cd transmitiendo 50 MW..... 67
5.4	Línea de cd transmitiendo 100 MW..... 67
5.5	Diagrama de la red 2 para el caso 2. Enlace de ca y cd operando en paralelo..... 68
5.6	Línea de cd transmitiendo 0 MW en paralelo con línea de ca..... 69
5.7	Línea de cd transmitiendo 50 MW en paralelo con línea de ca..... 70
5.8	Línea de cd transmitiendo 100 MW en paralelo con línea de ca..... 71
5.9	Línea de cd transmitiendo 0 MW. Se usa el método P-QCD..... 74

ÍNDICE DE FIGURAS (continuación)

Figura	Página
5.10	Línea de cd transmitiendo 50 MW. Se usa el método P-QCD..... 74
5.11	Línea de cd transmitiendo 100 MW. Se usa el método P-QCD..... 75
5.12	Línea de cd transmitiendo 0 MW. Se usa el método PCD-QCD..... 76
5.13	Línea de cd transmitiendo 50 MW. Se usa el método PCD-QCD..... 77
5.14	Línea de cd transmitiendo 100 MW. Se usa el método PCD-QCD..... 78
5.15	Red eléctrica 3 para los casos 1, 2 y 3 BTB en paralelo con LT de ca..... 80
5.16	BTB en paralelo transmitiendo 0 MW en MCP..... 80
5.17	BTB en paralelo transmitiendo 50 MW en MCP..... 81
5.18	BTB en paralelo transmitiendo 100 MW en MCP..... 81
5.19	BTB en paralelo transmitiendo 50 MW en MCV..... 82
5.20	BTB en paralelo transmitiendo 100 MW en MCV..... 82
5.21	BTB en paralelo en MCS a)..... 83
5.22	BTB en paralelo en MCS b)..... 83
5.23	Red eléctrica 4 para los casos 4, 5 y 6. Enlace asíncrono por medio de un BTB..... 84
5.24	BTB transmitiendo 0 MW en MCP..... 84
5.25	BTB transmitiendo 50 MW en MCP..... 85
5.26	BTB transmitiendo 0 MW en MCV..... 86
5.27	BTB transmitiendo 100 MW en MCV..... 86
5.28	BTB en MCS a)..... 87
5.29	BTB en MCS b)..... 87
A.1	Puente rectificador trifásico básico..... 97
A.2	Formas de onda del diodo rectificador. (a) corriente alterna en la fase "b"; (b) Forma de onda del voltaje ánodo común (ac) y cátodo común (cc); (c) Voltaje rectificado..... 98
A.3	Forma de onda del tiristor controlado. (a) Corriente alterna en la fase "b"; (b) Formas de onda del voltaje de cd rectificado..... 99
A.4	Efecto de la reactancia de conmutación. (a) Corriente alternando; (b) Formas de onda del voltaje de cd..... 100
A.5	Formas de onda del inversor. (a) Corriente alternando; (b) Formas de onda del voltaje de cd..... 104
A.6	Diagrama vectorial de P y Q..... 105
A.7	Enlace de cd de dos terminales..... 106
B.1	Esquema simbólico de la estación convertidora HVDC..... 108
B.2	Diagrama unifilar del BTB de Eagle Pass de 138 kV y 36 MVA..... 112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
2.1	Valores típicos de impedancia característica para líneas de diferentes voltajes.....	18
4.1	Variables en los nodos terminales de un enlace BTB.....	57
4.2	Variables en los nodos terminales de un enlace BTB.....	59
5.1	Parámetros de control del subsistema de cd.....	65
5.2	Resultados del subsistema de cd. Pcd = 0 MW.....	66
5.3	Resultados del subsistema de cd. Pcd = 50 MW.....	67
5.4	Resultados del subsistema de cd. Pcd = 100 MW.....	68
5.5	Resultados del subsistema de cd en paralelo. Pcd = 0 MW.....	69
5.6	Resultados del subsistema de cd en paralelo. Pcd = 50 MW.....	70
5.7	Resultados del subsistema de cd en paralelo. Pcd = 100 MW.....	71
5.8	Número de iteraciones y consumo de reactivos para los casos de enlace asíncrono y enlace en cd y ca en paralelo con el método secuencial.....	72
5.9	Número de iteraciones y consumo de reactivos para el caso de una línea ca en paralelo con una de cd con el método secuencial, transmitiendo 100 MW por la línea de cd y variando el ángulo de disparo.....	73
5.10	Resultados del subsistema de cd con el método P-QCD. Pcd = 0 MW.....	74
5.11	Resultados del subsistema de cd con el método P-QCD. Pcd = 50 MW.....	75
5.12	Resultados del subsistema de cd con el método P-QCD. Pcd = 100 MW.....	75
5.13	Resultados del subsistema de cd con el método PCD-QCD. Pcd = 0 MW.....	76
5.14	Resultados del subsistema de cd con el método PCD-QCD. Pcd = 50 MW.....	77
5.15	Resultados del subsistema de cd con el método PCD-QCD. Pcd = 100 MW.....	78
5.16	Número de iteraciones y consumo de reactivos para el caso de una línea ca en paralelo con una de de cd con el método unificado.....	79
5.17	Número de iteraciones y consumo de reactivos en el BTB en paralelo con una línea de ca en modo de control de voltaje y potencia.....	89
5.18	Número de iteraciones y consumo de reactivos en el BTB como enlace asíncrono entre 2 áreas en modo de control de voltaje y potencia.....	89
B.1	Comparación entre estaciones HVDC convencional y compacta.....	110
C.1	Datos de nodos de la red 1.....	116
C.2	Datos de líneas de la red 1.....	116
C.3	Datos del subsistema de cd.....	116
C.4	Datos de nodos de la red 2.....	117

ÍNDICE DE TABLAS (continuación)

Tabla		Página
C.5	Datos de líneas de la red 2.....	117
C.6	Datos de nodos de la red 3.....	118
C.7	Datos de líneas de la red 3.....	118
C.8	Datos de nodos de la red 4.....	118
C.9	Datos de líneas de la red 4.....	119

GLOSARIO

Las variables que se manejan a lo largo de este trabajo se definen a continuación:

A	Matriz jacobiana del sistema de cd
B_t	Suceptancia del transformador
C	Capacitancia
con	Indica que la variable es de la estación convertidora
$f(x)$	Representación de una ecuación en función de x
I	Corriente
I_{ca}	Corriente alterna
I_{cd}	Corriente directa
J	Matriz jacobiana
k,m,i,A,B	Representa el nombre del nodo
L	Inductancia
l	Longitud de la línea de transmisión
P	Potencia activa
p_a	Potencia activa de cd o ca por conductor
P_{ca}	Potencia activa en corriente alterna
P_{cd}	Potencia activa en corriente directa
P_m	Potencia máxima transmitida por la línea de transmisión
P_n	Potencia natural
Q	Potencia reactiva
Q_C	Potencia reactiva capacitiva
Q_L	Potencia reactiva inductiva
R	Resistencia de la línea de transmisión
\bar{R}	Vector de ecuaciones del sistema de cd
V	Voltaje
V_{ca}	Voltaje en corriente alterna
V_{cd}	Voltaje en corriente directa
x	Representación de una variable
X_c	Reactancia de conmutación

Z_s	Impedancia característica
θ	Ángulo de voltaje entre nodos
λ	Longitud de onda
ϕ	Ángulo de voltaje entre nodos
γ	Ángulo de extinción del tiristor

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 LA TRANSMISIÓN EN CORRIENTE DIRECTA EN ALTO VOLTAJE (HVDC)

La transmisión en HVDC es una opción técnica y económicamente viable para el transporte de electricidad, que es utilizada desde hace muchos años en diferentes países.

Una razón principal para optar entre una línea o enlace en corriente directa (*cd*) en lugar de uno en corriente alterna (*ca*) es el factor económico, especialmente en el caso de enlaces a grandes distancias (mayores a 500 km). Otra razón es la reducción de pérdidas, dado que en la línea de *cd* sólo se tienen pérdidas por el efecto joule; esto en grandes distancias o transmisión subterránea o submarina tiene grandes beneficios. Otro atractivo más para enlazar dos sistemas asincrónicamente mediante una línea de *cd* es que los disturbios no se transmiten de un sistema a otro, ya que no operan en sincronismo. Sin embargo, las estaciones convertidoras que se utilizan en los esquemas de transmisión en *cd* imponen altos requerimientos de potencia reactiva, por lo que es necesario tener disponibles fuentes locales de energía reactiva.

Los esquemas convencionales de transmisión en *cd* utilizan dos estaciones convertidoras (rectificadora e inversora) y un medio para la transmisión de energía, usualmente una línea de transmisión aérea o un cable subterráneo o submarino. Sin embargo, existen arreglos especiales donde las estaciones convertidoras se conectan sin utilizar un medio de transmisión, a este esquema se le conoce en la literatura como “Back to Back” (BTB). Los desarrollos con esta tecnología^[1] permiten, además de controlar la potencia activa por el enlace, dar apoyo para el soporte de voltaje mediante una inyección de potencia reactiva, en forma similar a la de un compensador estático de vars (STATCOM).

Un aspecto muy importante de estos esquemas es la rapidez del control disponible, mediante electrónica de potencia el cambio en la transmisión de potencia se logra en fracciones de segundo. Esto es atractivo especialmente en el caso donde los enlaces en *cd* y *ca* operan en paralelo, en esta situación el control del flujo de potencia activa en el enlace en *ca* se logra al controlar el flujo de la línea de *cd*.

Actualmente el desarrollo de la tecnología HVDC y sus aplicaciones permite vislumbrar un crecimiento en la utilización de la transmisión en *cd* para la interconexión de redes eléctricas.

1.2 EL PROBLEMA DE FLUJOS DE POTENCIA CA-CD

Al interconectar sistemas con enlaces en *cd* es necesario analizar el comportamiento integrado de los sistemas. Así el estudio de flujos de potencia en sistemas ca-cd es un problema donde es necesario simular el sistema de corriente alterna e incorporar el modelo de las estaciones convertidoras, la línea de *cd* y los controles asociados.

Los estudios de flujos de potencia ca-cd permitirán determinar la distribución de la potencia activa y reactiva en todos los elementos del sistema incluyendo los enlaces en *cd*, basada en los voltajes y ángulos de los nodos que operan en *ca* y la solución para las variables para el subsistema de *cd*. Este análisis es indispensable para evaluar el comportamiento en estado estable del sistema, tanto en la fase de planificación como en la operación del mismo.

Los métodos clásicos que se han utilizado para la solución de estudios de flujos en *ca* son el método de Newton-Raphson^[2] y el método desacoplado rápido^[3]. En la actualidad, la mayoría de los centros de control en el mundo utilizan estos algoritmos para el análisis en estado estable de sistemas eléctricos bajo condiciones normales de operación y ante contingencias.

Dada la eficiencia computacional de los métodos antes mencionados, en este trabajo se probarán alternativas para incorporar los modelos de sistemas en *cd* utilizando estas metodologías.

1.3 ANTECEDENTES

En 1954 se puso en operación el primer enlace en *cd* uniendo Västervik, Suecia con Visby, Gotland^[4]. Este desarrollo despertó el interés en el resto del mundo sobre esta tecnología y desde entonces a la fecha el desarrollo de investigaciones y nuevos proyectos ha crecido substancialmente.

Uno de los primeros autores en recopilar y desarrollar modelos de las estaciones convertidoras fue Kimbark^[4]. En su libro en 1971 presentó la base conceptual de la transmisión en *cd*, los modelos de estaciones convertidoras, así como los dispositivos de control y protección disponibles en esa fecha.

En las décadas de los 70's y 80's se propusieron diferentes métodos de solución para los estudios de flujos ca-cd. En 1976, Braunagel, Kraft y Whyson de la Commonwealth Edison Company^[5] desarrollaron un algoritmo para incluir las ecuaciones del convertidor y la línea de *cd* directamente en el Jacobiano del método de Newton Raphson. Las ecuaciones del subsistema en *cd* se transformaban a pu para ser compatibles con las ecuaciones del sistema en *ca*, el modelo permitía analizar cualquier número de terminales de *cd* integradas a una red de *ca*. En 1977, J.Reeve, G. Fahmy y B.Stott, de la Universidad de Waterloo^[6] propusieron otro método similar para sistemas HVDC multiterminales. En 1980, El-Marsafawy y Mathur de la Universidad de Manitoba^[7] publicaron una nueva técnica para la solución de sistemas ca-cd multiterminales, en este estudio se utilizó el método desacoplado rápido. El algoritmo manejaba todas las ecuaciones del sistema ca-cd simultáneamente y explotaba la dispersidad de las matrices involucradas.

En 1983, J. Arrillaga publicó los libros *High Voltage Direct Current Transmission*^[8] y *Computer Modelling of Electrical Power Systems*^[9]. En el primero se incluyeron los principios básicos de la conversión estática de potencia y la interacción que toma lugar entre una gran planta convertidora y los sistemas eléctricos. En el segundo se analizaron dos temas sumamente importantes, el modelado de estaciones convertidoras ca-cd y los estudios de flujos de potencia en sistemas integrados ca-cd incluyendo las técnicas de solución para este problema.

1.4 OBJETIVOS Y CONTENIDO DE LA TESIS

El objetivo del presente trabajo de tesis es el desarrollar algoritmos eficientes para analizar el funcionamiento en estado estable de enlaces síncronos y asíncronos operando en paralelo entre sistemas eléctricos con diferentes características.

Especialmente se desea lograr lo siguiente:

- Modelar sistemas HVDC para incorporar las ecuaciones correspondientes en estudios de flujos de potencia.
- Aplicar las técnicas ampliamente usadas para realizar estudios de flujos en *ca* y desarrollar variantes para la simulación de sistemas integrados ca-cd.
- Modelar esquemas BTB en estudios de flujos ca-cd y analizar el comportamiento de los diferentes modos de control.
- Presentar resultados de simulaciones en sistemas de prueba con los algoritmos desarrollados.
- Utilizar el lenguaje MATLAB[®] para el desarrollo de algoritmos.

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

En esta sección se describe la manera en que está organizado este trabajo de investigación, comentando brevemente el contenido de cada capítulo.

- **Capítulo 2.** Se presenta un panorama general de la transmisión en *cd* en alto voltaje (HVDC), se mencionan los tipos de enlaces que existen y sus características, así como las ventajas y desventajas de estos esquemas respecto a la transmisión en *ca*.
- **Capítulo 3.** Se resume la formulación clásica de flujos de potencia por medio de los métodos Newton-Raphson y desacoplado rápido, los cuales sirven de base para la elaboración de los algoritmos desarrollados posteriormente. Se presenta la formulación del problema de flujos de potencia *ca-cd*, se definen las variables de las estaciones convertidoras y las ecuaciones integradas del problema. Se desarrollan los algoritmos de flujos de *ca-cd* con dos técnicas de solución diferentes, la solución por el método secuencial y el método unificado.
- **Capítulo 4.** Se modela el esquema BTB y se detalla el procedimiento para su incorporación en el problema de flujos de potencia, los algoritmos desarrollados permiten la solución de sistemas que se interconectan con un enlace asíncrono o sistemas donde el enlace BTB opera en paralelo con un enlace de *ca*. Se detallan los modos de control utilizados en estos esquemas.
- **Capítulo 5.** Se presentan los resultados obtenidos con los algoritmos desarrollados en esta tesis, se utilizan diferentes redes de prueba para la evaluación de los algoritmos.
- **Capítulo 6.** A partir de observaciones y resultados obtenidos en capítulos anteriores, se resumen las conclusiones obtenidas en este trabajo. También se hacen recomendaciones para trabajos futuros sobre temas relacionados con esta tesis.
- **Apéndice A.** Se presenta la descripción de una estación convertidora *ca-cd*, que incluye los modelos para la operación como rectificador o inversor, la línea de transmisión y finalmente los modos de control de la misma.

- **Apéndice B.** Se describen las características de una estación convertidora HVDC compacta. Se mencionan sus aplicaciones, la capacidad y los elementos que la componen. Se hace una comparación con las estaciones convertidoras convencionales. Se describen las características del esquema BTB que enlaza Eagle Pass y Piedras Negras.
- **Apéndice C.** En esta sección se anexan los datos de las redes de prueba analizados en el capítulo 5.

CAPÍTULO 2

ASPECTOS GENERALES DE LA TRANSMISIÓN EN CORRIENTE DIRECTA

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se expondrá de manera general las características de los dispositivos que forman un enlace de corriente directa.

Se describen los elementos que forman un enlace de *cd*, los tipos de enlaces existentes, las ventajas y desventajas de este tipo de enlace, y la conexión entre los sistemas de *ca* y *cd*.

2.2 ENLACES DE CA Y CD DE EXTRA ALTO VOLTAJE

Los enlaces de transmisión de extra alto voltaje (EAV) son utilizados para el transporte de grandes cantidades de energía eléctrica, ya sea superpuestos a una red de *ca* de menor voltaje, o interconectando redes, o conectando plantas de generación distantes, el enlace puede ser en corriente alterna o corriente directa. El término “enlace de transmisión” denota a la línea de transmisión junto con su equipo terminal y auxiliar.

La figura 2.1a muestra un circuito sencillo de una línea trifásica de *ca*. En general una línea en las categorías mencionadas, requiere transformadores en ambos extremos – transformadores elevadores en el extremo de envío y transformadores reductores en el extremo de recepción – aunque en algunos casos estos pueden ser omitidos en uno o ambos extremos.

La mayoría de las líneas de *ca* largas (> 300 km) requieren compensación en serie o paralelo. En la figura 2.1, se muestra un banco de capacitores en serie en medio de la línea.

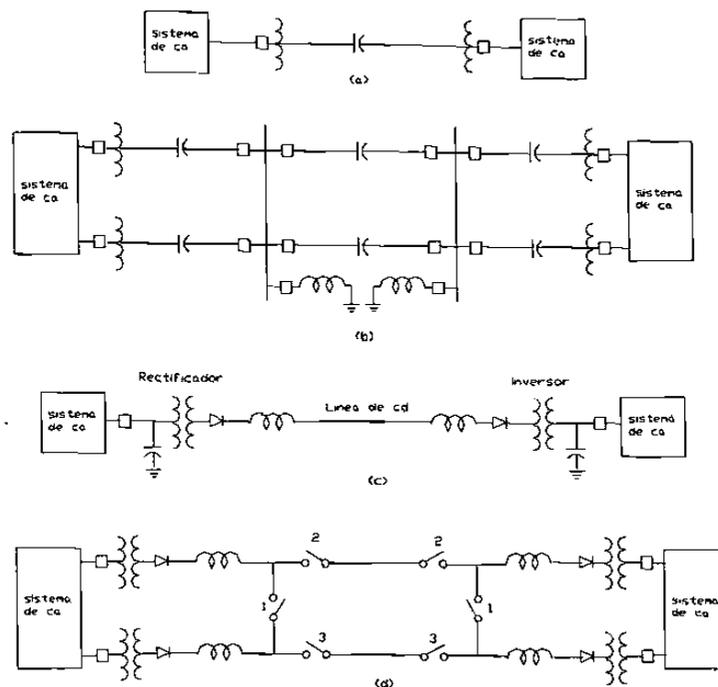


Figura 2.1. Constitución de enlaces de ca y de EAV mostrados por diagramas unifilares

En muchos casos la operación tripolar es usada para liberar fallas permanentes, aunque tales fallas involucren sólo un conductor. Siendo esto así, usualmente son requeridos dos circuitos trifásicos en paralelo para una transmisión confiable (ver figura 2.1b). Los enlaces de gran longitud en *ca* de dos circuitos son usualmente seccionados por medio de estaciones de switcheo intermedias por varias razones. Entre ellas:

- (a) Mejora del límite de estabilidad de potencia atribuido a la desconexión de uno de los circuitos para liberar una falla o para mantenimiento de la línea.
- (b) Limitar el sobre voltaje cuando una línea es energizada de un extremo.
- (c) Proveer un lugar para la conexión de transformadores aterrizados para limitar los sobre voltajes de las fases no falladas con respecto a tierra cuando una de las fases esta con falla a tierra.
- (d) Para conexión de cargas intermedias o de centrales generadoras.

En muchas líneas de EAV, es necesario instalar reactores en derivación para limitar el voltaje, especialmente al operar con cargas bajas, pero pueden ser requeridos aún a plena carga. Estos reactores son usualmente colocados en estaciones intermedias de switcheo y están indicadas también en la figura 2.1b.

En la figura 2.1c se muestra un enlace típico de *cd*. La línea tiene dos conductores, aunque algunas líneas tienen sólo uno donde el retorno es por tierra o el agua de mar o ambos. Las estaciones convertidoras están en ambos extremos de la línea, teniendo como componentes transformadores y válvulas de rectificación/inversión. La estación convertidora en el extremo de envío es llamada **rectificador** y la del extremo de recepción es el **inversor**. Sin embargo, un convertidor puede funcionar como rectificador o inversor, permitiendo que la potencia sea transmitida en cualquier dirección. Por supuesto que la línea de *ca* tiene también esta característica.

Los interruptores son instalados en el lado de *ca* de las estaciones convertidoras. Estos interruptores no son usados para liberar fallas en la línea de *cd*, estas fallas pueden ser liberadas más rápido por medio del control de los tiristores. Más bien los interruptores son requeridos para liberar las fallas en los transformadores o para poner todo el enlace de *cd* fuera de servicio.

Los filtros de armónicos y los capacitores en derivación suministran potencia reactiva a las estaciones convertidoras y se conectan en el lado de *ca* de las mismas. Los reactores de alisamiento de *cd* son conectados en serie con cada polo de la línea de *cd*.

Se puede afirmar que una línea de *cd* de dos conductores provee la misma confiabilidad que una línea trifásica de dos circuitos con seis conductores, ya que cualquier conductor de la línea de *cd* puede ser usado con retorno por tierra en forma continua o por periodos limitados de tiempo.

Si se requiere mayor confiabilidad de la línea de *cd* que la de un arreglo de dos conductores, se pueden utilizar tres o cuatro conductores. Un arreglo de una línea de cuatro conductores es mostrado en la figura 2.1d, con dos convertidores por terminal. Los interruptores de enlace del bus 1 están normalmente abiertos. Si ocurre una falla permanente en un conductor, la estación convertidora controlaría la corriente y voltaje en cero. Entonces se aislaría la línea con falla por medio de los interruptores.

La comparación rápida de los enlaces de *ca* y *cd* muestra que:

- (a) La línea de *cd* es más simple, teniendo uno o dos conductores en lugar de tres.
- (b) El equipo de la terminal es más complejo, requiriendo grupos de tiristores y equipo auxiliar que la línea de *ca* no necesita.

2.3 TIPOS DE ENLACES DE CD

Algunos enlaces típicos de corriente directa se muestran en la figura 2.2.

- En el enlace “**back to back**” (BTB) las estaciones convertidoras están en el mismo lugar, no es necesaria una línea de transmisión en *cd* entre ellos. Las unidades son idénticas, conectadas como se muestra, y en cualquier caso pueden trabajar como rectificador o inversor.
- El enlace **monopolar** tiene un conductor, usualmente de polaridad negativa y el retorno es por tierra o mar.
- El enlace **bipolar** tiene dos conductores, uno positivo y otro negativo. Cada terminal tiene dos convertidores de igual voltaje en serie en el lado de *cd*. Los neutros (unión entre convertidores) pueden estar aterrizados en uno o ambos extremos. Si ambos neutros están aterrizados, los dos polos pueden operar independientemente. Normalmente ellos operan a igual corriente; entonces no hay corriente a tierra. En el evento de una falla en un conductor, el otro conductor con retorno por tierra puede llevar la mitad de la carga.
- El enlace **homopolar** tiene dos o más conductores todos con la misma polaridad, usualmente negativa, y siempre opera con retorno por tierra. En el evento de una falla en un conductor, toda la estación convertidora está disponible para conexión con el conductor o conductores restantes, los cuales, teniendo la misma capacidad de sobrecarga, pueden llevar más de la mitad de la potencia indicada, y quizás toda la potencia indicada al costo de incrementar las pérdidas en la línea. Una línea homopolar es preferible a una línea bipolar en los casos donde no hay objeción en tener una corriente a tierra continua.

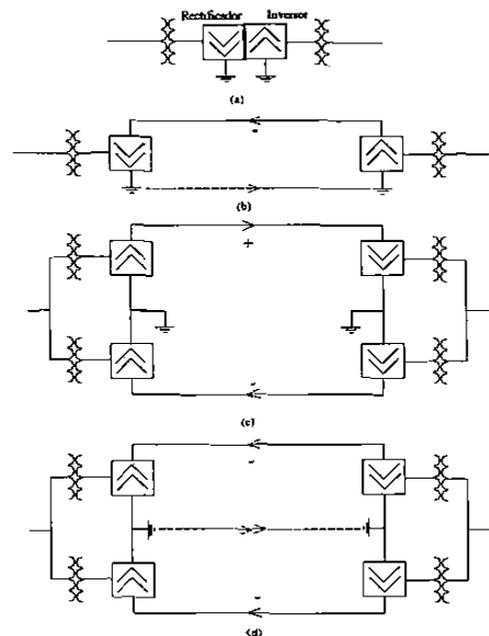


Figura 2.2. Tipos de enlaces de cd. (a) BTB; (b) monopolar; (c) bipolar; (d) homopolar

2.4 TECNOLOGÍA Y COMPONENTES DE ESTACIONES CONVERTIDORAS HVDC

El diseño conceptual de las estaciones convertidoras clásicas HVDC data de los 70's, donde los tiristores tomaron el lugar de las válvulas de arco de mercurio. Pero ha habido un desarrollo acelerado de los equipos y sistemas en corriente directa.

Una estación convertidora HVDC usa tiristores para llevar a cabo la conversión de *ca* a *cd* y viceversa. El puente de tiristores está conectado al sistema de *ca* por medio de transformadores.

El convertidor HVDC produce corrientes armónicas (11^a , 13^a , 23^a , 25^a , 37^a , etc.) en el lado de *ca*. La entrada de estas armónicas a la red de *ca* es controlada por medio de filtros que son circuitos resonantes formados por capacitores y reactores. Los filtros también producen parte de la potencia reactiva consumida por la estación convertidora.

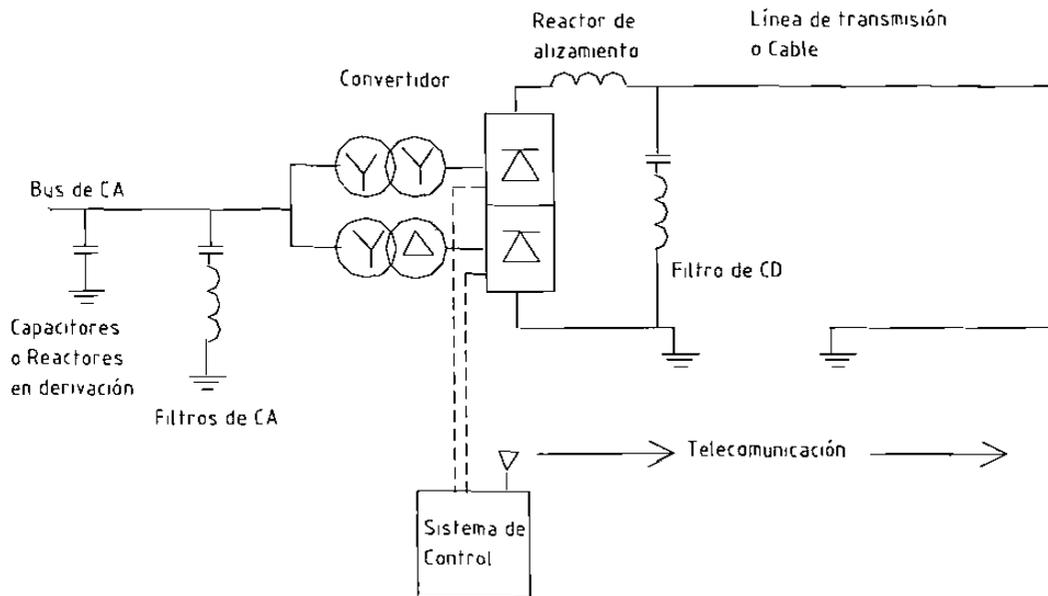


Figura 2.3. Estación convertidora HVDC.

El convertidor HVDC también produce voltajes armónicos en el lado de *cd* por lo que siempre se instala un reactor de alizamiento para reducir el rizado en voltaje y corrientes. Además, el filtro de *cd* normalmente se usa también para reducir corrientes armónicas en la línea aérea de *cd*. Las armónicas pueden causar interferencia a los circuitos telefónicos en la vecindad de la línea de *cd*.

La potencia transmitida en un enlace en *cd* está controlada por medio de un sistema de control, que ajusta los instantes de disparo de los tiristores para obtener la combinación deseada de voltaje y corriente en el sistema.

Tiristores en estaciones convertidoras

Los tiristores son el corazón del proceso de conversión CA-CD-CA. Los tiristores modernos tienen un excelente historial de desempeño y pérdidas reducidas.

El circuito básico usado es el puente Graetz que consiste de seis tiristores. Para eliminar las armónicas de orden mayor, se utilizan dos puentes conectados en serie para formar un convertidor de doce pulsos.

Los tiristores son normalmente colocadas dentro de un edificio y se acomodan en estructuras suspendidas del techo de la sala. Cada módulo consiste de un arreglo de tiristores conectados en serie y paralelo. Los tiristores de la HVDC son enfriadas con agua desionizada.

Los tiristores son controlados por pulsos generados en una unidad electrónica de control de tiristor (TCU por sus siglas en ingles) localizada cerca de cada tiristor. Estas unidades reciben pulsos de disparo 50 o 60 veces por segundo por medio de guías de luz.

Transformadores de la estación convertidora HVCD

Los transformadores de las estaciones convertidoras son el equipo más pesado en una estación.

El transformador es una parte integral de un sistema de HVDC. Los niveles de voltaje de *ca* y de *cd* ponen requerimientos específicos en el aislamiento. Las corrientes no sinusoidales dan un incremento adicional a las pérdidas, las cuales son de consideración. Los transformadores se conectan a la red de *ca* con el puente de tiristores, y ajustan el voltaje al nivel deseado basado en el voltaje de *cd* usado para la transmisión. Los transformadores pueden ser de diferentes diseños dependiendo de la potencia transmitida y de las posibles limitaciones en el transporte. El tipo más común es un diseño monofásico de tres devanados. Se necesitan tres transformadores idénticos por convertidor.

Las funciones del transformador:

- o Suministrar los voltajes de *ca* mediante una conexión que permita la reducción de armónicas de bajo orden, especialmente la 5ª y 7ª armónica.
- o Actuar como una barrera galvánica entre los sistemas de *ca* y *cd*.
- o Servir como impedancia en el sistema de *ca* para reducir las corrientes de corto circuito y para controlar la corriente en los tiristores durante la conmutación.
- o Preparar la transformación del voltaje entre la fuente de *ca* y el sistema de HVDC.
- o Permitir el ajuste de la fuente de voltaje mediante un rango en las derivaciones del transformador.

Potencia reactiva y filtros de ca

Los convertidores HVDC convencionales demandan potencia reactiva. En operación normal, un convertidor requiere potencia reactiva, aproximadamente el 50 % de la potencia activa transmitida. La manera menos costosa para obtener la potencia reactiva es usando bancos de capacitores conectados en paralelo. Algunos de estos bancos de capacitores pueden ser combinados con reactores y resistencias para formar filtros que a su vez son trayectos de baja impedancia para las armónicas.

La rama en serie del filtro resonante dará una muy baja impedancia y por lo tanto un filtrado eficiente en una banda de frecuencia alrededor de la frecuencia sintonizada. Tales ramas son normalmente usadas para la 11^a y 13^a armónicas. Para las armónicas de orden mayor, los niveles de corriente son bajos, pero estas frecuencias tienen el impacto más grande en la interferencia telefónica. Por lo tanto deben de ser también atenuadas, pero la impedancia del filtro puede ser más grande para las armónicas 11^a y 13^a. Así, los filtros de ancho de banda, normalmente del tipo pasa alto, son usados para hacerse cargo de todas las armónicas desde la 23^a hacia arriba.

Reactor de alizamiento

El reactor está normalmente conectado en serie con el convertidor. Los objetivos principales del reactor son:

- o Reducir las corrientes armónicas en el lado de *cd* del convertidor.
- o Reducir el riesgo de fallas de conmutación limitando el nivel del incremento de la corriente de la línea de *cd* en disturbios transitorios en el sistema de *ca* o de *cd*.

El reactor también contribuye a reducir el rizado y el efecto adverso en sistemas telefónicos.

La mayoría de los reactores de alizamiento son de núcleo de aire, pero los reactores de grandes proyectos de HVDC son con frecuencia unidades construidas con núcleo de hierro y aislamiento de aceite.

Filtro de cd

Para líneas de transmisión aéreas de HVDC, el filtro de cd permite reducir la interferencia telefónica.

El reactor de alizamiento, que es instalado por otras razones, es un elemento importante en el filtrado de armónicas en el lado de cd . Para líneas de transmisión aéreas, es normalmente necesario instalar filtros adicionales entre el polo y neutro. Los filtros puede que sean instalados también entre el bus neutro y tierra. Los tipos de filtros usados en el lado de cd son esencialmente los mismos que los usados en el lado de ca , o sea, filtros resonantes y filtros pasa altos.

Sistema de control del HVDC

Una ventaja importante de la transmisión HVDC es su controlabilidad. Una estación moderna está equipada con un microprocesador para el control y sistema de protección. El sistema de control es el cerebro del sistema de transmisión HVDC.

El control básico de potencia se lleva a cabo mediante un sistema donde uno de los convertidores controla el voltaje de cd y el otro convertidor controla la corriente en el circuito de cd . El sistema de control ajusta el ángulo de disparo de los tiristores y ajusta el cambiador de taps en los transformadores de los convertidores. Dependiendo de la tecnología utilizada, cada polo en un enlace bipolar de HVDC tiene su propio sistema de control y un sistema de control redundante. En el modo normal, el sistema de control de cada estación en un sistema HVDC de dos terminales se comunica con la otra mediante un enlace de telecomunicación. La mayoría de las transmisiones de HVDC son controladas desde un centro de despacho.

2.5 LIMITACIONES Y VENTAJAS DE LA TRANSMISIÓN EN CA Y CD

Con el uso universal de la corriente alterna para la transmisión de potencia eléctrica, así como para la generación, distribución, es interesante preguntar que limitaciones tiene la transmisión de *ca* que ha llevado al uso de transmisión de *cd* en algunos proyectos.

Las limitaciones pueden ser técnicas – que algo no se pueda hacer – o económicas – que sea más barato hacerlo de otra forma -. En la mayoría de los casos prácticos las limitaciones económicas dictan la elección final de diseño.

El interés es determinar las limitaciones sobre la cantidad de potencia transmitida y sobre la distancia a la cual puede ser transmitida. Para esto debemos analizar el método más barato para transmitir una cierta potencia de manera confiable a una cierta distancia.

2.5.1 Límite de corriente

La temperatura de un conductor debe de ser limitada para evitar el daño al conductor mismo o, en caso de un cable, al aislamiento. Por tanto, la corriente en el conductor debe ser limitada de acuerdo con sus características y la temperatura ambiente. El límite de corriente es pocas veces alcanzado en líneas aéreas largas de *ca*, ya que otros límites son alcanzados primero, sin embargo en cables el límite de corriente es importante.

La resistencia de *ca* de un conductor es más alta que la resistencia de *cd* debido al efecto piel, pero la diferencia no es importante en conductores no magnéticos para los calibres usuales a las frecuencias de 60 hz.

2.5.2 Límites de voltaje

El voltaje normal de trabajo y los sobrevoltajes causados por la conexión/desconexión de elementos y por descargas atmosféricas deben de ser limitados a valores que no causen arco o fallas en el aislamiento. En líneas aéreas de EAV, la sobretensión por switcheo produce los sobrevoltajes transitorios más serios. En líneas de *cd* se han hecho intentos para limitar dichos voltajes a valores pico de dos o tres veces el voltaje pico normal. En líneas

aéreas, el máximo voltaje de trabajo o el mínimo calibre del conductor es limitado también por pérdidas y la interferencia debido al efecto corona. En *ca*, el radio de interferencia durante mal tiempo (lluvia, nieve, o niebla) es usualmente el factor limitante. Las líneas de *cd* tienen una ventaja distinta, el radio de interferencia disminuye un poco con el mal clima, mientras que la interferencia debido a las líneas de *ca* incrementa por el mal tiempo. En cables, donde el factor limitante es usualmente el voltaje normal de trabajo, el aislamiento resistirá un voltaje directo más alto que la cresta de voltaje alterno, la cual es 1.4 veces el valor rms del voltaje de *ca*.

2.5.3 Potencia reactiva y regulación de voltaje

En líneas aéreas largas de EAV en *ca* y en muchos cables cortos de *ca*, los requisitos de potencia reactiva de la línea misma constituyen un serio problema. En una línea con inductancias L en serie y capacitancias C por unidad de longitud y operando a un voltaje V y corriente I , la línea intercambia potencia reactiva capacitiva

$$Q_C = \omega CV^2 \quad (2.1)$$

y potencia reactiva inductiva

$$Q_L = \omega LI^2 \quad (2.2)$$

por unidad de longitud.

$$\omega CV^2 = \omega LI^2$$

La condición donde se logra el balance de potencia reactiva define la impedancia característica.

$$\frac{V}{I} = \left(\frac{L}{C}\right)^{1/2} = Z_s \quad (2.3)$$

Y la potencia natural

$$P_n = VI = \frac{V^2}{Z_s} \quad (2.4)$$

que también recibe el nombre de carga natural. Esta potencia es independiente de la distancia y depende del voltaje. Los valores típicos para las líneas aéreas trifásicas se presentan en la tabla 2.1.

Voltaje (kV)	115	138	230	400	500
Impedancia característica de carga (MW)	35	50	137	528	830

Tabla 2.1. Valores típicos de impedancia característica para líneas de diferentes voltajes.

La mayoría de las líneas no pueden ser operadas siempre a su carga natural, porque las cargas varían con el tiempo. Por economía la carga en una línea aérea es usualmente mayor que la carga natural. Por lo que se pierde el balance y los requisitos de potencia reactiva deben ser suministrados al sistema. Si la carga en la línea es menor que la natural, la energía reactiva se portea entre las líneas y el sistema.

Por eso para mantener voltajes iguales y constantes en ambos extremos, la potencia reactiva debe de ser absorbida en cargas bajas y suministrada a altas cargas.

En líneas de arriba de 250 millas (400 km) de largo, la potencia reactiva es ordinariamente suministrada a las terminales. En el pasado, los condensadores síncronos eran comúnmente usados para este propósito. Ellos podían controlar el voltaje con la potencia reactiva necesaria. Actualmente los compensadores estáticos de vars son ampliamente utilizados.

Otras desventajas de las líneas de transmisión largas no compensadas es su límite de potencia. Para cualquier longitud l la máxima potencia que puede ser transmitida por una línea está dada por:

$$P_m = P_n \sec \theta \quad (2.5)$$

donde

$$\theta = l \sqrt{LC} = \frac{2\pi l}{\lambda} = \beta l \quad (2.6)$$

l es la longitud actual y λ la longitud de onda. Para una carga mayor que la carga natural, hay una distancia máxima; por ejemplo, para $P = 1.5P_n$, esta distancia corresponde al ángulo de la línea de $\sec^{-1}(P_m/P_n) = \sec^{-1}1.5 = 41.8^\circ$ y es $(41.8/360)\lambda$, o 360 millas a 60 Hz. Cuando la

longitud de la línea se aproxima a este valor, la potencia reactiva que debe ser suministrada a la línea se incrementa rápidamente y el voltaje en medio de la línea cae rápidamente.

Otra limitación de líneas largas es el alto voltaje con un extremo abierto (el efecto Ferranti). Esto es importante cuando una línea está siendo puesta en servicio conectando primero uno de los extremos al sistema principal de *ca*, porque no es factible cerrar ambos extremos al mismo tiempo.

La transmisión de potencia de *ca* a larga distancia es factible sólo con el uso de compensación en serie y en paralelo, aplicada a intervalos a lo largo de la línea.

Una línea de *cd* no requiere potencia reactiva, y la caída de voltaje en la línea misma es meramente una caída resistiva *RI*. Sin embargo, los convertidores en ambos extremos de la línea, requieren potencia reactiva de los sistemas de *ca*. Esto varía con la transmisión de potencia. Usualmente los capacitores en derivación o los condensadores síncronos están instalados para suministrar esta potencia reactiva.

En resumen, las líneas de *ca* y *cd* tienen la desventaja de requerir fuentes ajustables de potencia reactiva. Sin embargo para distancias de más de 400 km (250 mi) la línea de *cd* requiere menos potencia reactiva que una línea de *ca*.

En cables submarinos o subterráneos, la situación es diferente a las líneas aéreas. Los cables siempre son operados a una carga menor que la carga de impedancia característica para evitar el sobrecalentamiento. Consecuentemente la potencia reactiva producida por la capacitancia en derivación excede grandemente la que es requerida por la inductancia en serie. En un cable de 50 o 60 Hz, de 40 a 80 km de longitud, la corriente capacitiva alcanza el límite de la línea y no deja margen para la corriente de carga. La compensación en paralelo podría teóricamente corregir esta situación. Sin embargo, se requieren reactores en paralelo, quizás a intervalos de 10 mi (16 km). Como es difícil poner y reparar un cable submarino al cual están conectados reactores en derivación, la longitud práctica para cables submarinos de *ca* es sólo de alrededor de 20 mi (30 km). Las líneas de *cd* no tienen tal limitación.

2.5.4 Estabilidad

La estabilidad de un sistema de *ca* es la capacidad de operar con todas las máquinas síncronas del sistema en sincronismo. En un sistema con máquinas fuera de sincronismo la transmisión de potencia no puede ser controlada y tiene fluctuaciones de voltaje inaceptables.

Usualmente las máquinas síncronas pueden perder sincronismo después de algún disturbio grande, por ejemplo un corto circuito, a menos que la línea esté operada abajo de su límite de estabilidad transitoria.

El problema de estabilidad o de operación síncrona constituye la limitación más seria de un sistema de transmisión de *ca*.

La distancia a la cual la potencia puede ser transmitida sin perder estabilidad puede ser extendida considerablemente colocando condensadores síncronos o, mejor aún, generadores síncronos en varios puntos intermedios del sistema de transmisión.

El método más económico de incrementar la distancia de un sistema de transmisión radial es usando capacitores en serie, cuya reactancia compensa parte de la reactancia inductiva en serie de la línea misma. Asumiendo que la máxima distancia viable de la línea que puede ser compensada es del 75 %, la distancia para la transmisión estable a 60 Hz de la carga natural de una línea aérea puede ser incrementada. Tales cantidades de compensación en serie no han sido usadas aún, 35 a 50 % es lo más usual.

Un enlace de transmisión en *cd* en si mismo no tiene problemas de estabilidad. Dos sistemas de *ca* separados e interconectados sólo por una línea de *cd* no operan en sincronismo aún si sus frecuencias nominales son iguales, y pueden operar a diferentes frecuencias nominales, por ejemplo, uno a 50 Hz y el otro a 60 Hz. Cada uno de los sistemas de *ca* separados puede tener sus propios problemas internos de estabilidad. La interrupción sostenida de la potencia en la línea de *cd* constituye una amenaza a la estabilidad igual a la causada por las pérdidas de grandes cargas en el sistema del extremo de envío y a pérdidas de generación en el sistema de recepción.

Si los dos sistemas de *ca* están conectados por una o más líneas de *ca* en adición a la línea de *cd* de capacidad similar, una interrupción repentina sostenida de la potencia en la línea de *cd* puede resultar en una pérdida de sincronismo entre los dos sistemas de *ca*. Por

tanto, la operación en paralelo de una línea de *cd* y una o más líneas de *ca* es poco aconsejable a menos que las líneas de *ca* sean suficientemente fuertes para soportar la pérdida de la línea de *cd*.

Sin embargo, si hay dos o más líneas de *cd* en paralelo con una o más líneas de *ca*, cuando una de las líneas de *cd* se pierde, la otra línea o líneas toman su carga. En tal caso, no hay gran problema de estabilidad.

2.5.5 Interruptores de circuitos

Los interruptores de corriente alterna toman ventaja de que las corrientes cruzan por cero dos veces por ciclo. El diseño busca incrementar la fuerza para romper el arco entre los contactos lo más rápido posible para que el arco no se vuelva a reencender. Los interruptores de circuito de corriente directa no tienen esta ventaja natural y por lo tanto tienen que forzar la corriente a cero.

En un esquema de transmisión en *cd* sencillo de dos terminales, la falta de interruptores de circuito de *cd* no se ha resentido, porque las fallas en la línea de *cd* o en las estaciones convertidoras son liberadas usando los sistemas de control de los tiristores para bloquear la corriente directa temporalmente. La experiencia en la transmisión en *ca*, ha demostrado que la mayoría de las líneas que inicialmente operan radiales después son incorporadas a la red de *ca*. La falta de interruptores de circuito de *cd* es un impedimento para hacer derivaciones o mallar las líneas de *cd*. Se han presentado propuestas para la operación de una línea de tres o cuatro terminales en la cual una sección fallada de la línea puede ser desconectada llevando el voltaje de todo el sistema a cero, abriendo los interruptores para aislar la sección fallada, y entonces elevar el voltaje de nuevo al normal. El tiempo para toda la secuencia de eventos sería aproximadamente igual al que ahora se requiere para un rápido recierre de los interruptores de un circuito de *ca*.

No obstante, la ausencia de interruptores de circuito de HVDC debe ser considerada como una limitación presente de la transmisión de HVDC.

2.5.6 Corriente de corto circuito

La interconexión de sistemas de *ca* a través de una línea de *ca* eleva las corrientes de corto circuito, algunas veces se va a requerir reemplazar los interruptores de circuito existentes por interruptores de más capacidad cuando la corriente de corto circuito exceda su capacidad nominal de interrupción. Sin embargo, la interconexión de sistemas de *ca* mediante un enlace de *cd* casi no incrementa las corrientes de corto circuito de los sistemas de *ca*, porque la línea de *cd* no contribuye con corriente a un corto circuito de *ca* más allá de su valor permitido.

Por otro lado, la operación de la terminal de la línea de *cd* requiere que la potencia de corto circuito del sistema de *ca* en el punto de instalación sea varias veces (por lo menos cinco) el valor de la potencia de la línea de *cd*, y algunas veces estos requerimientos dictan el incremento de la potencia de corto circuito por la provisión de condensadores síncronos o conexiones de *ca* adicionales.

La corriente en un corto circuito en una línea de *cd*, después de un transitorio momentáneo debido a una descarga de una capacitancia en paralelo con la línea, es limitado por el control automático de red al doble del valor de la corriente. Tampoco las fallas en la línea de *cd* toman excesiva corriente de los sistemas de *ca*.

2.5.7 Potencia por conductor y por circuito

Suponiendo que una línea de *ca* y una línea de *cd* usan los mismos conductores y aisladores. ¿Cómo se puede comparar la potencia por conductor en las dos líneas?

Si la corriente está limitada por el incremento de la temperatura, entonces la corriente directa iguala a la corriente alterna rms.

Si se supone que los aisladores soportan la misma tensión momentánea máxima a tierra en cada caso. Entonces el voltaje en *cd* es $\sqrt{2}$ veces el voltaje *ca* rms.

La potencia de *cd* por conductor es:

$$p_a = V_{cd} I_{cd} \quad (2.7)$$

y la potencia por conductor en *ca* es:

$$p_a = V_{ca} I_{ca} \cos \phi \quad (2.8)$$

donde I_{cd} e I_{ca} son las corrientes por conductor, V_{cd} y V_{ca} son los voltajes de conductor a tierra, y $\cos \phi$ es el factor de potencia. La relación es

$$\frac{P_{cd}}{P_{ca}} = \frac{V_{cd} I_{cd}}{V_{ca} I_{ca} \cos \phi} = \frac{V_{cd}}{V_{ca}} \cdot \frac{I_{cd}}{I_{ca}} \cdot \frac{1}{\cos \phi} = \frac{\sqrt{2}}{\cos \phi} \quad (2.9)$$

Tomando $\cos \phi = 0.945$, $p_{cd}/p_{ca} = 1.5$.

Comparando ahora una línea trifásica en ca de tres conductores con una línea de cd bipolar de dos conductores. Las capacidades respectivas de potencia de los circuitos son

$$P_{cd} = 2p_{cd}$$

$$P_{ca} = 3p_{ca}$$

y la relación es

$$\frac{P_{cd}}{P_{ca}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{p_{cd}}{p_{ca}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{3}{2} = 1 \quad (2.10)$$

Ambas líneas pueden llevar la misma potencia. Sin embargo, la línea de cd , es más simple de momento ya que usa dos conductores en lugar de tres. Consecuentemente la línea aérea en cd requiere sólo $\frac{2}{3}$ del total de aisladores en ca . Así mismo, las torres son más simples y más baratas, ya que requieren un derecho de vía más angosto.

El porcentaje de pérdidas de la línea de cd es sólo dos tercios de la línea de ca . Si la base de comparación es la igualdad del porcentaje de pérdidas, la potencia de la línea trifásica de ca es $\sqrt{2/3}$ de la línea de cd en dos conductores.

Si se usan cables en lugar de líneas aéreas, el voltaje por unidad de espesor de aislamiento es más alto para corriente directa que para corriente alterna, y, además, el factor de potencia para corriente directa es la unidad y, para corriente alterna, es considerablemente más bajo. Ambos cambios adicionales son a favor de la corriente directa sobre la corriente alterna porque incrementan la relación de potencia de cd con respecto a la potencia de ca por conductor. La relación resultante debe de ser de 5 a 10.

Porque el límite de potencia de las líneas aéreas de ca es por lo regular determinado por otros factores además que el calentamiento del conductor, la relación de la potencia de cd por conductor con respecto a la potencia de ca por conductor puede ser tan alta como 4.

2.5.8 Retorno por tierra

Una línea bipolar en *cd* de dos conductores es más confiable que una línea de tres conductores en *ca*, porque cuando ocurre una falla en un conductor, el otro conductor puede continuar la operación con retorno por tierra durante el periodo requerido para reparar la falla. La operación de una línea en *ca* con retorno por tierra no es posible teniendo en cuenta la alta impedancia de tal circuito y la interferencia telefónica causada por tal operación.

Una línea en *cd* monopolar con retorno por tierra es aun más simple que una línea en *ca* trifásica y es igual de confiable. Es especialmente recomendada para cable submarino. Una línea de *cd* puede ser construida en etapas con operación monopolar inicialmente, y después cambiar a operación bipolar con el doble del rango de potencia.

2.5.9 Equipo de la terminal

Los convertidores requeridos en ambos extremos del enlace de transmisión de *cd* han probado ser confiables pero de alto costo. También constituyen un cuello de botella para la transmisión de potencia, ya que los tiristores tienen pequeña capacidad de sobrecarga.

2.5.10 Armónicos

Los convertidores usados con la línea de *cd* producen voltajes y corrientes armónicos en los lados de *ca* y *cd*. Estos armónicos, especialmente en las extensas redes de *ca*, pueden causar interferencia con la audio frecuencia de las líneas telefónica. Se requieren filtros en el lado de *ca* de cada convertidor para disminuir la magnitud de los armónicos en las redes de *ca*. Esto incrementa el costo de las estaciones convertidoras. Afortunadamente los capacitores usados en los filtros también suministran parte de la potencia reactiva requerida por los convertidores. El costo de los filtros y la potencia reactiva adicional debería ser considerada como parte del costo de la terminal de la línea de *cd*.

2.5.11 Unidades generadoras

Algunas estaciones generadoras hidroeléctricas conectadas a centros de carga a través de largas líneas de *ca* tienen generadores con reactancia transitoria bajas o con inercias altas para elevar el límite de estabilidad. Estas características elevan el costo de los generadores. Si se usara transmisión en *cd*, no sería necesario tener diseños especiales ya que no habría problemas de estabilidad. Además si tal estación fuera conectada a un sistema de *ca* sólo a través de líneas *cd*, se podría permitir que la velocidad de los primo motores variara con la carga o con la caída de agua, quizás dando un primo motor más barato y/o eficiente, y la frecuencia nominal del generador, no estaría confinada mas a 50 o 60 Hz.

2.6 RESUMEN DE VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA TRANSMISIÓN DE HVDC

2.6.1 Ventajas

- Más potencia por conductor.
- Construcción más simple de la línea.
- El retorno por tierra puede ser usado.
- Cada conductor puede ser usado como un circuito independiente.
- No hay corriente de carga inductiva.
- No hay efecto piel.
- Los cables pueden trabajar a magnitudes de voltajes más altos.
- El factor de potencia de la línea es siempre la unidad; no se requiere compensación reactiva.
- Menos pérdidas por efecto corona y radio interferencia, especialmente en mal clima.
- No se requiere operación síncrona.
- No está limitada por estabilidad.
- Se pueden interconectar sistemas de *ca* de diferentes frecuencias.
- Baja corriente de corto circuito en la línea de *cd*.

- No contribuye a la corriente de corto circuito del sistema de *ca*.
- La potencia del enlace es fácilmente controlada.

2.6.2 Desventajas

- Convertidores de alto costo.
- Convertidores requieren potencia reactiva.
- Convertidores generan armónicas, y requieren filtros.
- Convertidores tienen poca capacidad de sobrecarga.
- La falta de interruptores impide hacer derivaciones o mallar las líneas de *cd*.

2.7 PRINCIPALES APLICACIONES DE LA TRANSMISIÓN EN CD

De acuerdo con las ventajas y deficiencias de la transmisión en *cd*, se recomiendan las siguientes aplicaciones:

1. Para cables submarinos de más de 20 mi (32 km).
2. Para interconectar sistemas de *ca* que tienen diferentes frecuencias o donde se requiere la operación asíncrona.
3. Para transmitir grandes cantidades de potencia a grandes distancias en líneas aéreas.
4. En áreas urbanas congestionadas o en lugares donde sea difícil adquirir el derecho de vía para líneas aéreas y donde las longitudes involucradas hacen que los cables de *ca* sean imprácticos.

2.8 FACTORES ECONÓMICOS

El costo por unidad de longitud de una línea de *cd* es menor que el de una línea de *ca* de la misma potencia, pero el costo del equipo de la subestación de una línea de *cd* es mucho mayor que el de una línea de *ca*. Existe una distancia donde se logra el equilibrio, en la cual, si la distancia de transmisión es más corta, la transmisión de *ca* es más barata que la de *cd*; si

es más larga, la transmisión de *cd* es más barata. Para cables subterráneos y submarinos, esta distancia de equilibrio es más corta.

En el futuro se espera una gran disminución del costo de las subestaciones para líneas de *cd*, conforme aumente la experiencia y el volumen de producción en comparación, con el costo del equipo de *ca*. El resultado sería una disminución en la distancia de equilibrio.

2.9 RESUMEN

En este capítulo se presentaron los diferentes tipos de enlaces de *cd* y sus características.

Se enumeraron los elementos que componen una estación convertidora y su función dentro de la misma. También se da una introducción al sistema de control, el cual es una de las principales ventajas de la utilización de los enlaces en *cd*.

Dado que es importante conocer los límites técnicos de la estación convertidora al estar interconectada con la red en *ca*, en la sección 2.5 se mencionan los límites de voltaje y corriente, estabilidad, armónicas, retorno por tierra, etc.

Se muestra también un listado comparativo de ventajas y desventajas de la transmisión en *cd* contra un sistema de transmisión en *ca* convencional, y al operar como parte de un sistema interconectado en *ca*.

En la sección 2.7 se mencionan las aplicaciones en donde es viable la utilización de los enlaces en *cd*, o bajo que condiciones conviene la transmisión en *cd*.

Finalmente se comentan los factores económicos que son tomados en cuenta para la construcción de las estaciones convertidoras y enlaces en *cd* en lugar de los convencionales enlaces en *ca*.

CAPÍTULO 3

ESTUDIOS DE FLUJOS CA-CD

3.1 INTRODUCCIÓN

Los estudios de flujos clásicos tienen que ser sustancialmente modificados para modelar la operación de sistemas híbridos *ca* y *cd*, donde se consideran condiciones especificadas de carga y generación incluyendo las estrategias de control del sistema de *cd*.

3.2 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

El método generalizado de Newton-Raphson (N-R)^{[2][9]} ha sido ampliamente utilizado para resolver problemas de flujos de potencia en sistemas de *ca*. Es un algoritmo iterativo para resolver un conjunto de ecuaciones simultáneas no lineales con igual número de incógnitas.

$$\begin{aligned} f_k(x_m) &= 0 & (3.1) \\ k &= 1, N \\ m &= 1, N \end{aligned}$$

En cada iteración del método de N-R, el problema no lineal es linealizado. La aproximación lineal es utilizada para llegar a la solución con un procedimiento iterativo confiable. En el caso de una variable es posible ilustrar la ecuación utilizada en la solución de un problema.

En la figura 3.1, x^p es una aproximación de la solución, y Δx^p define el cambio en la iteración p . Si se aproxima la función mediante la serie de Taylor,

$$f(x) = f(x^p) + \Delta x^p f'(x^p) + \frac{(\Delta x^p)^2}{2!} f''(x^p) + \dots \quad (3.2)$$

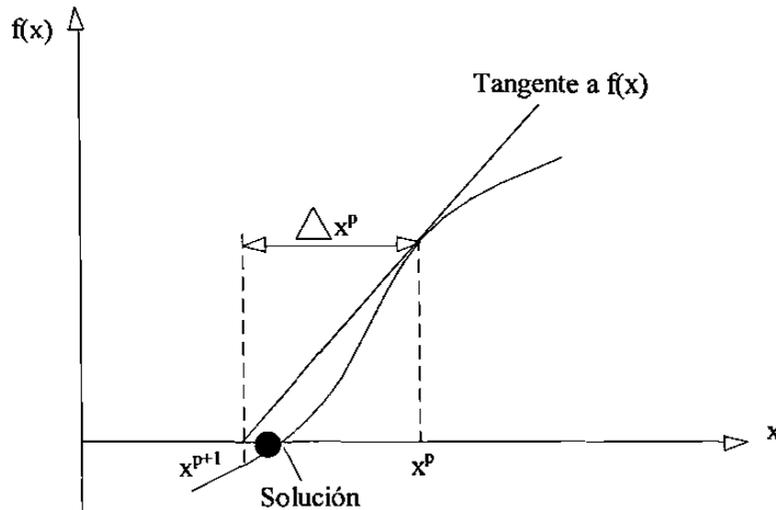


Figura 3.1 Aproximación lineal de una función de una variable

Si los estimados iniciales de la variable x^p están cercanos al valor de la solución, Δx^p será relativamente pequeño y todos los términos de más alto orden pueden ser despreciados. Por tanto, la aproximación lineal

$$f(x^p) + \Delta x^p f'(x^p) = 0 \quad (3.3)$$

resulta en un cambio

$$\Delta x^p = \frac{-f(x^p)}{f'(x^p)} \quad (3.4)$$

El nuevo valor de la variable se actualiza

$$x^{p+1} = x^p + \Delta x^p \quad (3.5)$$

La ecuación (3.3) puede ser escrita en forma matricial como:

$$f(x^p) = -J \Delta x^p \quad (3.6)$$

donde se representa a un conjunto de N ecuaciones con N incógnitas y J se convierte en una matriz Jacobiana de derivadas parciales de primer orden de la función $f_k(x_m)$. Los elementos de $[J]$ están definidos por:

$$J_{km} = \frac{\partial f_k}{\partial x_m} \quad (3.7)$$

y representa las pendientes de las tangentes que aproximan las funciones $f_k(x_m)$ en cada punto de iteración.

El algoritmo de Newton-Raphson alcanzará convergencia cuadráticamente si las funciones tienen primeras derivadas continuas en la vecindad de la solución, la matriz Jacobiana es no-singular y las aproximaciones iniciales de x están cercanas a la solución. Sin embargo el método es sensible al comportamiento de las funciones $f_k(x_m)$ y por lo tanto a su formulación. Entre más lineal sean, más rápida y confiablemente alcanzará convergencia el método de N-R. La no homogeneidad en cualquiera de las funciones en la región de interés, puede causar retraso en la convergencia, falla total o desviación a una solución no deseada.

Aplicación del método de N-R en estudios de flujos en CA^{[2][9]}

En coordenadas polares las ecuaciones de potencia activa y reactiva son:

$$P_k = \sum_{m \in k} V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \quad (3.9)$$

$$Q_k = \sum_{m \in k} V_k V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.10)$$

donde

$$\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$$

Las ecuaciones lineales se obtienen de pequeñas variaciones en las variables θ y V llevando a las siguientes ecuaciones incrementales,

$$\Delta P_k = \sum_{m \in k} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} \Delta \theta_m + \sum_{m \in k} \frac{\partial P_k}{\partial V_m} \Delta V_m \quad (3.11)$$

$$\Delta Q_k = \sum_{m \in k} \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} \Delta \theta_m + \sum_{m \in k} \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} \Delta V_m \quad (3.12)$$

El conjunto completo de ecuaciones está formado por dos ecuaciones para cada nodo de carga y una para cada nodo de voltaje controlado. El algoritmo entonces se convierte en:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{p-1} \\ \Delta Q^{p-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{p-1} & N^{p-1} \\ J^{p-1} & L^{p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^p \\ \Delta V^p / V^{p-1} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

La división de ΔV_i^p entre V_i^{p-1} no afecta numéricamente el algoritmo, pero simplifica algunos términos de la matriz Jacobiana.

Un diagrama de flujos del algoritmo básico del método de N-R para un estudio de flujos de potencia se muestra en la figura 3.2.

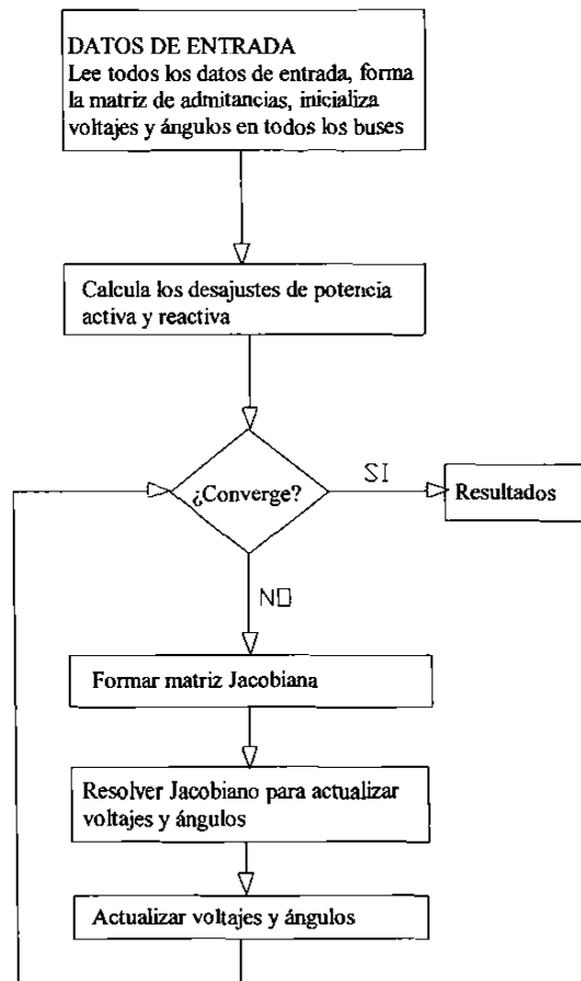


Figura 3.2. Diagrama de bloques del algoritmo básico de flujos de potencia usando el método Newton-Raphson

3.3 ESTUDIOS DE FLUJO POR EL MÉTODO DESACOPLADO RÁPIDO (D-R)^[3]

Este método se desarrolló como una variante del método de N-R, las aproximaciones realizadas permiten separar los modelos de potencia activa y reactiva. El atractivo es que los modelos resultantes emplean matrices constantes que no requieren ser retriangularizadas en cada iteración del proceso iterativo. Es un método eficiente y confiable para la solución del problema de flujos en sistemas de ca .

Las ecuaciones del método desacoplado rápido resultantes son:

Modelo activo

$$[\Delta P/V] = [B'] [\Delta \theta] \quad (3.14)$$

Modelo reactivo

$$[\Delta Q/V] = [B''] [\Delta V] \quad (3.15)$$

donde los elementos de la matriz B' y B'' se determinan mediante

$$B'_{km} = -\frac{1}{X_{km}}, \text{ para } m \neq k$$

$$B'_{kk} = \sum_{m \neq k} \frac{1}{X_{km}}$$

$$B''_{km} = -B_{km}, \text{ para } m \neq k$$

$$B''_{kk} = \sum_{m \neq k} B_{km}$$

Estas ecuaciones (3.14) y (3.15) son resueltas alternativamente usando los valores disponibles más recientes de V y θ como se muestra en la figura 3.3.

Las matrices B' y B'' son reales y de orden $(N - 1)$ y $(N - M)$ respectivamente, donde N es el número de nodos y M es el número de nodos de voltaje controlado. B'' es simétrica en valor. Los elementos de las matrices son constantes y necesitan ser evaluadas y triangularizadas sólo una vez en cada simulación de flujos de potencia.

La convergencia del método es geométrica, de dos a cinco iteraciones son requeridas para una exactitud práctica, y es más confiable que el método formal de Newton. Esto es debido a que los elementos de B' y B'' son aproximaciones fijas de las tangentes de las funciones definidas $\Delta P/V$ y $\Delta Q/V$, y no son susceptibles a cualquier irregularidad en las funciones definidas.

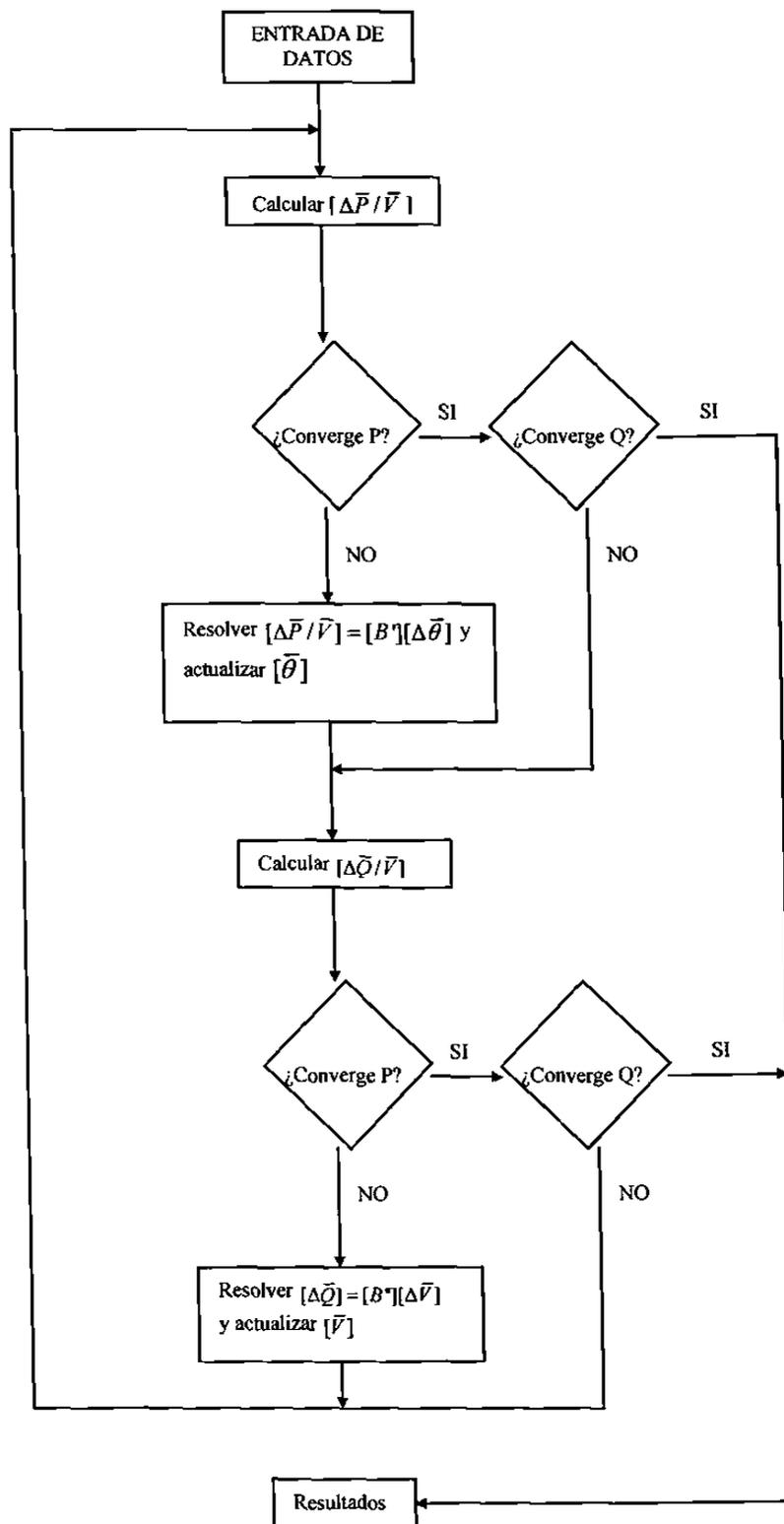


Figura 3.3 Diagrama de bloques de flujos de potencia usando el método Desacoplado Rápido

3.4 CRITERIOS DE CONVERGENCIA

El criterio normal para convergencia en flujos de carga es que el desajuste nodal de potencia debe ser pequeño, esto es ΔQ_i y/o ΔP_i , dependiendo del tipo de nodo i , el cual puede tomar diferentes formas, por ejemplo,

$$|\Delta P_i| \leq c_1, \text{ para todos los nodos} \quad (3.16)$$

$$|\Delta Q_i| \leq c_2, \text{ para todos los nodos}$$

El valor de c usado en la práctica varía de sistema a sistema y de problema a problema. En un gran sistema $c = 1 \text{ MW/MVAR}$ permite lograr la exactitud requerida para la mayoría de los propósitos.

3.5 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA CA-CD¹⁹¹

El estado del sistema eléctrico combinado (ca y cd) está definido por el vector

$$[\bar{V}, \bar{\theta}, \bar{x}]^T$$

donde

\bar{V} vector de magnitudes de voltaje en todos los nodos del sistema de ca .

$\bar{\theta}$ vector de ángulos de fase en nodos del sistema de ca .

\bar{x} vector de variables de cd .

El desarrollo de un algoritmo basado en el método de Newton-Raphson requiere la formulación de n ecuaciones independientes en términos de n variables.

Las ecuaciones que se relacionan con las variables del sistema de ca son obtenidas de las condiciones de operación específicas del sistema de ca . La única modificación requerida para los desajustes de potencia activa y reactiva ocurre en las ecuaciones relacionadas en los nodos convertidores (con).

$$P_{con}^{sp} - P_{con}(ca) - P_{con}(cd) = 0 \quad (3.17)$$

$$Q_{con}^{sp} - Q_{con}(ca) - Q_{con}(cd) = 0 \quad (3.18)$$

donde

$P_{con}(ca)$ es la potencia activa en un nodo convertidor en función de variables del sistema de ca

$P_{con}(cd)$ es la potencia activa en un nodo convertidor en función de variables del sistema de cd

P_{con}^p es la carga activa de ca

y similarmente para la potencia reactiva $Q_{con}(cd)$ y $Q_{con}(ca)$

Las potencias inyectadas $Q_{con}(cd)$ y $P_{con}(cd)$ son funciones del voltaje del nodo convertidor de ca y de las variables del sistema de cd , esto es

$$P_{con}(cd) = f(V_{con}, \bar{x}) \quad (3.19)$$

$$Q_{con}(cd) = f(V_{con}, \bar{x}) \quad (3.20)$$

Las ecuaciones para condiciones especificadas del sistema pueden ser resumidas como:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{P}(\bar{V}, \bar{\theta}) \\ \Delta \bar{Q}(\bar{V}, \bar{\theta}) \\ \Delta \bar{P}_{con}(\bar{V}, \bar{\theta}, \bar{x}) \\ \Delta \bar{Q}_{con}(\bar{V}, \bar{\theta}, \bar{x}) \end{bmatrix} = 0 \quad (3.21)$$

donde los desajustes en nodos convertidores son indicados por separado.

Las ecuaciones independientes obtenidas de las condiciones del sistema de cd se pueden expresar mediante un vector R :

$$\bar{R}(V_{con}, \bar{x})_k = 0 \quad (3.22)$$

para k número de convertidores.

Las ecuaciones del sistema de cd (3.19), (3.20) y (3.22) son independientes de los ángulos $\bar{\theta}$ del sistema de ca si se selecciona un ángulo de referencia para las variables del sistema de cd , como se define en la figura 3.4.

Por lo tanto el problema general de flujos ca-cd puede ser resumido como la solución de:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{P}(\bar{V}, \bar{\theta}) \\ \Delta \bar{Q}(\bar{V}, \bar{\theta}) \\ \Delta \bar{P}_{con}(\bar{V}, \bar{\theta}, \bar{x}) \\ \Delta \bar{Q}_{con}(\bar{V}, \bar{\theta}, \bar{x}) \\ \bar{R}(V_{con}, \bar{x}) \end{bmatrix} = 0 \quad (3.23)$$

donde el subíndice “con” se refiere al nodo convertidor de ca .

3.6 MODELO DEL SISTEMA DE CD^{[4][8][9]}

La selección de variables \bar{x} y la formulación de las ecuaciones se realizan con algunas consideraciones básicas;

- (i) Los voltajes de ca en la barra del convertidor son balanceados y sinusoidales.
- (ii) La operación del convertidor es perfectamente balanceada.
- (iii) El voltaje y corriente directa no tienen rizado.
- (iv) El transformador del convertidor no tiene pérdidas y la admitancia de magnetización es ignorada.

3.6.1 Variables del convertidor

Bajo condiciones balanceadas, los puentes convertidores operarán de manera similar sin importar la conexión del transformador. Estos pueden ser reemplazados por un puente equivalente sencillo. El conjunto de variables, ilustrado en la figura 3.4, permiten una completa descripción de la operación del convertidor.

Un circuito equivalente para el convertidor es mostrado en la figura 3.5, donde se incluye la modificación explicada en la sección 3.5 considerando la posición del ángulo de referencia.

Las variables en la figura 3.5 son las siguientes:

$V_{con} \angle \phi_{con}$ voltaje nodal del nodo convertidor

E/ψ	Componente de frecuencia fundamental del voltaje en el secundario del transformador del convertidor
I_p, I_s	Componente de la corriente en el primario y secundario del transformador del convertidor
α	ángulo de disparo
a	relación de tap del transformador
V_{cd}	voltaje de <i>cd</i>
I_{cd}	corriente directa en el convertidor

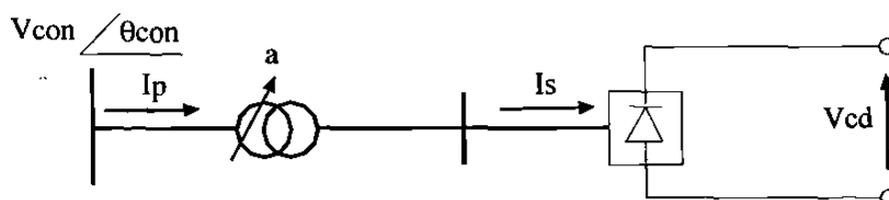


Figura 3.4 Convertidor básico de *cd* (ángulos referidos al sistema de *ca*)

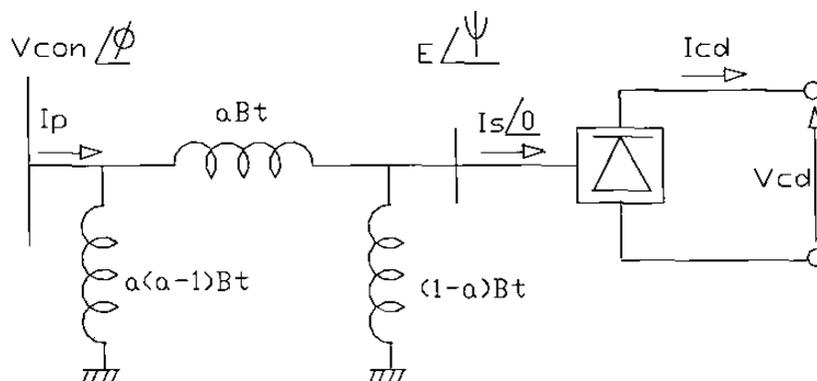


Figura 3.5 Circuito monofásico equivalente para el convertidor básico (ángulos referidos al sistema de *cd*).

Estas diez variables, nueve asociadas con el convertidor, más la magnitud de voltaje terminal V_{con} , forman una posible elección de \bar{x} para la formulación de las ecuaciones (3.19), (3.20) y (3.22).

El número mínimo de variables requeridas para definir la operación del sistema es el número de variables independientes. Cualquier otra variable del sistema puede ser escrita en términos de estas variables.

Dos variables independientes son suficientes para modelar un convertidor de *ca-cd*, operando bajo condiciones balanceadas, desde una fuente de voltaje conocida. Sin embargo, los requerimientos de control de los convertidores del sistema de HVDC es tal que un rango de variables, o funciones de ellas (por ejemplo potencia constante), son condiciones especificadas.

Por estas razones, todas las variables que son influenciadas por la acción de control son retenidas en el modelo. Esto está en contraste con los estudios de flujos de *ca* donde, debido a la naturaleza restringida de las especificaciones de control, el mínimo conjunto es normalmente usado.

El siguiente conjunto de variables permite una simple relación para todas las estrategias de control.

$$[\bar{x}] = [V_{cd}, I_{cd}, \alpha, \cos \alpha, \phi]^T$$

La variable ϕ es incluida para asegurar una simple expresión para Q_{cd} . Mientras esto es importante en la formulación de la solución unificada, la variable ϕ puede ser omitida con la solución secuencial ya que no está envuelta en la formulación de cualquier especificación de control; el $\cos \alpha$ es usado en lugar de α para linealizar las ecuaciones y esto mejora la convergencia.

3.6.2 Sistema por unidad de CD

Para evitar la conversión a valores reales y para permitir el uso de tolerancias de convergencia comparables en los desajustes nodales de los sistemas de *ca* y *cd*, se utiliza un sistema por unidad para el sistema de *cd*.

Por simplicidad computacional es conveniente mantener la potencia y voltaje base común en ambos lados del convertidor, esto es, en los lados de *ca* y *cd*. Consecuentemente, para preservar la consistencia en por unidad, la corriente directa base, tiene que ser $\sqrt{3}$ veces más grande que la corriente base de *ca*.

Esto tiene el efecto de cambiar los coeficientes involucrados en las relaciones de corriente de ca-cd. Para una corriente directa perfectamente constante y despreciando el traslape de conmutación, las componentes fundamentales de la corriente de fase es relacionada a I_{cd} con la siguiente aproximación,

$$I_s = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{cd} \quad (3.24)$$

Trasladando la ecuación (3.24) a por unidad:

$$I_s(p.u.) = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sqrt{3} I_{cd}(p.u.)$$

y si se toma en cuenta el traslape de conmutación, esta ecuación se convierte en

$$I_s(p.u.) = k \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{cd}(p.u.) \quad (3.25)$$

donde k tiene un valor cercano a la unidad. En estudios de flujos, la ecuación (3.25) puede suponerse sin perder precisión:

$$k = 0.995$$

3.6.3 Ecuaciones del sistema de cd

Las siguientes relaciones de las variables mostradas en la figura 3.5 son utilizadas. Las ecuaciones están en por unidad.

- (i) La magnitud de corriente fundamental en el lado de ca del convertidor está relacionada con la corriente directa mediante la ecuación

$$I_s = k \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{cd} \quad (3.26)$$

- (ii) Las magnitudes de corriente fundamental en ambos lados del transformador sin pérdidas se relacionan con el tap fuera del nominal (a)

$$I_p = a I_s \quad (3.27)$$

- (iii) El voltaje de cd puede ser expresado en términos de una fuente de voltaje conmutado referido al secundario del transformador

$$V_{cd} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a V_{con} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} I_{cd} X_c \quad (3.28)$$

La fuente de voltaje conmutado del convertidor de ca es el voltaje de la barra del convertidor, V_{cd} .

- (iv) El voltaje y la corriente de cd están relacionadas por la configuración del sistema de cd

$$F(V_{cd}, I_{cd}) = 0 \quad (3.29)$$

por ejemplo, para un rectificador simple suministrando a una carga pasiva,

$$F(V_{cd}, I_{cd}) = V_{cd} - I_{cd} R_{cd} = 0$$

- (v) La potencia activa relaciona la potencia de cd con la potencia del secundario del transformador en términos solamente de la componente fundamental, esto es

$$V_{cd} I_{cd} = E I_s \cos \psi \quad (3.30)$$

- (vi) Como el transformador es sin pérdidas, la potencia activa en el primario del transformador también puede ser calculada para la potencia de cd , esto es

$$V_{cd} I_{cd} = V_{con} I_p \cos \phi \quad (3.31)$$

- (vii) La componente fundamental de la corriente a través del transformador del convertidor puede ser expresada como

$$I_s = E B_t \text{sen} \psi - B_t a V_{con} \text{sen} \phi \quad (3.32)$$

donde B_t es la susceptancia de dispersión del transformador.

Las variables I_p , I_s , E y ψ pueden ser eliminadas ya que no forman parte en la definición de las especificaciones de control.

Por lo tanto las ecuaciones (3.26), (3.27), (3.30) y (3.31) pueden ser combinadas dentro de

$$V_{cd} - k_1 a V_{con} \cos \phi = 0 \quad (3.33)$$

donde $k_1 = k(3\sqrt{2}/\pi)$.

Las dos ecuaciones finales independientes requeridas son derivadas del modo especificado de control.

El modelo de cd puede ser representado por un vector de ecuaciones R como sigue:

$$\bar{R}(\bar{x}, V_{con})_k = 0 \quad (3.34)$$

donde

$$R(1) = V_{cd} - k_1 a V_{con} \cos \phi$$

$$R(2) = V_{cd} - k_1 a V_{con} \cos \alpha + \frac{3}{\pi} I_{cd} X_c$$

$$R(3) = f(V_{cd}, I_{cd})$$

$$R(4) = \text{ecuación de control}$$

$$R(5) = \text{ecuación de control}$$

y

$$\bar{x} = [V_{cd}, I_{cd}, a \cos \alpha, \phi]^T$$

V_{con} puede ser una cantidad especificada o una variable del sistema de ca . Estas ecuaciones para P_{con} y Q_{con} pueden ahora ser escritas como,

$$\begin{aligned} Q_{con}(cd) &= V_{con} I_p \text{sen} \phi \\ &= V_{con} k_1 a I_{cd} \text{sen} \phi \end{aligned} \quad (3.35)$$

y

$$\begin{aligned} P_{cd}(cd) &= V_{con} I_p \cos \phi \\ &= V_{cd} k_1 a I_{cd} \cos \phi \end{aligned} \quad (3.36)$$

o

$$P_{con}(cd) = V_{cd} I_{cd} \quad (3.37)$$

3.6.4 Incorporación de las ecuaciones de control

Cada convertidor adicional en el sistema de cd contribuye con dos variables independientes para el sistema y por tanto dos restricciones adicionales deben ser obtenidas de la estrategia de control del sistema para definir el estado de operación. Por ejemplo, un enlace de cd clásico de dos terminales tiene dos convertidores y por lo tanto requiere cuatro ecuaciones de control. Las cuatro ecuaciones deben de ser escritas en términos de diez variables de cd (cinco por cada convertidor).

Cualquier función de diez variables del sistema de cd es una ecuación de control válida mientras cada ecuación sea independiente de las otras. En la práctica, hay restricciones

que limitan el número de alternativas. Algunas estrategias de control se refieren a las características de transmisión de potencia (por ejemplo potencia constante o corriente constante), otras introducen restricciones tales como los mínimos ángulos de disparo o extinción.

Ejemplos de especificaciones de control válidas son:

- (i) Tap especificado en el transformador del convertidor

$$\alpha - \alpha^{sp} = 0$$

- (ii) Voltaje de cd especificado

$$V_{cd} - V_{cd}^{sp} = 0$$

- (iii) Corriente de cd especificada

$$I_{cd} - I_{cd}^{sp} = 0$$

- (iv) Mínimo ángulo de disparo especificado

$$\cos \alpha - \cos \alpha_{\min} = 0$$

- (v) Transmisión de potencia de cd especificada

$$V_{cd} I_{cd} - P_{cd}^{sp} = 0$$

Estas ecuaciones de control son simples y son fácilmente incorporadas dentro del algoritmo de solución. Además de los modos usuales de control, modos no estándares tales como voltaje terminal de ca puede ser también incluido como ecuación de control del convertidor.

Durante el procedimiento de solución iterativa las variables no controladas del convertidor pueden salirse de los límites prespecificados. Cuando esto ocurre, la variable infractora es usualmente detenida en su valor límite y una variable de control apropiada es liberada.

3.6.5 Operación del inversor

Todas las ecuaciones presentadas hasta aquí para una estación convertidora son igualmente aplicables al proceso de inversión. Sin embargo, durante la inversión el ángulo de extinción (γ) es el que está sujeto al control y no el ángulo de disparo (α). Por lo tanto, por conveniencia la ecuación $R(2)$ de (3.34) puede ser escrita como

$$V_{cd} - k_1 a V_{con} \cos(\pi - \gamma) - \frac{3}{\pi} X_c I_{cd} = 0 \quad (3.38)$$

Esta ecuación es válida para rectificación o inversión. Bajo inversión, V_{cd} sería negativa.

Para especificar la operación con ángulo de extinción constante, se usa la siguiente ecuación:

$$\cos(\pi - \gamma) - \cos(\pi - \gamma^{sp}) = 0$$

donde γ^{sp} es usualmente γ mínimo para un mínimo consumo de potencia reactiva del inversor.

3.7 TÉCNICAS DE SOLUCIÓN^[9]

El modelo del convertidor desarrollado en la sección 3.6 puede ser incorporado en un algoritmo de flujos de potencia mediante el desacoplado rápido con modificaciones mínimas.

3.7.1 Solución unificada

El método unificado resuelve simultáneamente las ecuaciones de los sistemas de ca y cd . Con referencia a la ecuación (3.23), el algoritmo estándar de Newton-Raphson involucra la solución repetida de la ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{P}(\bar{V}, \bar{\theta}) \\ \Delta \bar{Q}(\bar{V}, \bar{\theta}) \\ \Delta P_{con}(\bar{V}, \bar{\theta}, \bar{x}) \\ \Delta Q_{con}(\bar{V}, \bar{\theta}, \bar{x}) \\ \bar{R}(V_{con}, \bar{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{\theta} \\ \Delta \bar{\theta}_{con} \\ \Delta \bar{V} \\ \Delta \bar{V}_{con} \\ \Delta \bar{x} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

donde J es la matriz de derivadas parciales de primer orden.

$$\Delta P_{con} = P_{con}^{sp} - P_{con}(ca) - P_{con}(cd) \quad (3.40)$$

$$\Delta Q_{con} = Q_{con}^{sp} - Q_{con}(ca) - Q_{con}(cd) \quad (3.41)$$

y

$$P_{con}(cd) = f(V_{con}, \bar{x}) \quad (3.42)$$

$$Q_{con}(cd) = f(V_{con}, \bar{x}) \quad (3.43)$$

$$P_{con}(ca) = f(V_{con}, X_{ca}) \quad (3.44)$$

$$Q_{con}(ca) = f(V_{con}, X_{ca}) \quad (3.45)$$

donde

X_{ca} representa a las variables del sistema de ca

Aplicando las consideraciones del desacoplado rápido de ca para todos los elementos del Jacobiano relacionados a las ecuaciones del sistema de ca se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta \bar{P}}{\bar{V}} \\ \frac{\Delta P_{con}/V_{con}}{\bar{V}} \\ \frac{\Delta \bar{Q}}{\bar{V}} \\ \frac{\Delta Q_{con}/V_{con}}{\bar{R}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B' & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & DD & AA' \\ 0 & 0 & B'' & 0 \\ 0 & 0 & B''_u & AA'' \\ 0 & 0 & 0 & BB'' & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{\theta} \\ \Delta \theta_{con} \\ \Delta \bar{V} \\ \Delta V_{con} \\ \Delta \bar{x} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Las matrices $[B']$ y $[B'']$ son los jacobianos usuales del desacoplado rápido y son de valor constante. Las otras matrices indicadas varían en cada iteración en el proceso de solución.

La matriz B''_u en la ecuación (3.46) requiere modificación. Este elemento es una función del sistema de variables y por lo tanto varía en cada iteración.

El ángulo de referencia del sistema de ca es independiente del sistema de cd lo que resulta en

$$\partial P_{con}(cd) / \partial \theta_{con} = 0$$

o sea el elemento diagonal del Jacobiano para el desajuste de la potencia real en la terminal del bus convertidor depende sólo de las cantidades de ca y es por lo tanto el elemento B' usual del desacoplado rápido.

Para mantener la secuencia de iteraciones de un estudio desacoplado rápido de ca convencional, es necesario desacoplar la ecuación (3.46). Por tanto las submatrices Jacobianas deben de ser examinadas con más detalle. Las submatrices Jacobianas son:

$$\begin{aligned}
 DD &= \frac{1}{V_{con}} \partial \Delta P_{con} / \partial V_{con} \\
 &= \frac{1}{V_{con}} \{ \partial P_{con}(ca) / \partial V_{con} \} + \frac{1}{V_{con}} \{ \partial P_{con}(cd) / \partial V_{con} \}
 \end{aligned}$$

Siguiendo la aproximación de un estudio desacoplado rápido^{[31][9]}, DD se considera una matriz nula. Similarmente se llega a la simplificación siguiente:

$$\begin{aligned}
 [AA'] &= \frac{1}{V_{con}} [\partial P_{con}(cd) / \partial \bar{x}] \\
 [AA''] &= \frac{1}{V_{con}} [\partial Q_{con}(cd) / \partial \bar{x}] \\
 [BB''] &= \partial \bar{R} / \partial V_{con} \\
 [A] &= \partial \bar{R} / \partial \bar{x} \\
 B''_{ii} &= B''_{ii}(ca) + B''_{ii}(cd)
 \end{aligned}$$

En la formulación de arriba las variables de cd \bar{x} están acopladas a los desajustes de potencia real y reactiva de ca . Sin embargo, la ecuación (3.46) puede ser separada para permitir que el esquema de iteraciones sucesivas sea usado.

Las variables y los desajustes de cd pueden ser unidos a las dos ecuaciones del desacoplado rápido de ca , en tal caso resultan las dos siguientes ecuaciones

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{P} / \bar{V} \\ \Delta P_{con} / V_{con} \\ \bar{R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B' & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{\theta} \\ \Delta \theta_{con} \\ \Delta \bar{x} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{Q} / \bar{V} \\ \Delta Q_{con} / V_{con} \\ \bar{R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B'' & 0 \\ B''_{ii} & AA'' \\ 0 & BB'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{V} \\ \Delta V_{con} \\ \Delta \bar{x} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

El diagrama de flujo ilustrado en la figura 3.6 es referido como el esquema “ $P-Q$ ” debido a la secuencia en que se resuelve.

El algoritmo se puede simplificar aún más al reconocer las siguientes características de los sistemas de ca y cd ^[9];

- El acoplamiento entre las variables de cd y el voltaje terminal de ca es fuerte.
- El acoplamiento entre los desajustes en cd y los ángulos del sistema de ca es muy bajo.
- En todas las estrategias de control, la potencia de cd está bien controlada lo que implica que los cambios en las variables de cd \bar{x} no afectan grandemente los desajustes de potencia real en las terminales.

Estas características justifican la remoción de las ecuaciones de cd de la ecuación (3.47) para obtener un esquema de iteraciones sucesivas representado por las siguientes dos ecuaciones,

$$[\Delta \bar{P} / \bar{V}] = [B'] [\Delta \bar{\theta}] \quad (3.49)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{Q} / \bar{V} \\ \Delta Q_{con} / V_{con} \\ \bar{R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B'' & 0 \\ B''_{ii} & AA'' \\ 0 & BB'' & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{V} \\ \Delta V_{con} \\ \Delta \bar{x} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

3.7.2 Consideraciones de programación para los algoritmos unificados

Para retener la eficiencia del método desacoplado rápido para flujos de potencia, las matrices B' y B'' deben de ser factorizadas una sola vez.

Los elementos del jacobiano relacionados a las variables de cd son no constantes y deben ser reevaluados en cada iteración. Es por lo tanto necesario separar las partes constantes y no constantes de las ecuaciones para la rutina de solución.

Inicialmente, las ecuaciones de ca son formadas ignorando el enlace de cd . La ecuación del desajuste de potencia reactiva del sistema de ca es:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{Q} / \bar{V} \\ \Delta Q'_{con} / V_{con} \end{bmatrix} = [B''] \begin{bmatrix} \Delta \bar{V} \\ \Delta V_{con} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

donde

$$\Delta Q'_{con} = Q_{con}^{sp} - Q_{con}(ca)$$

es el desajuste calculado en la ausencia del convertidor de cd .

y

B'' es el Jacobiano usual del desacoplado rápido.

Después de hecha la triangularización, excluyendo los nodos de los convertidores, la ecuación (3.51) se vuelve

$$\begin{bmatrix} (\Delta \bar{Q} / \bar{V})'' \\ (\Delta Q_{con} / V_{con})'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B'' \\ B''_{con} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{V} \\ \Delta V_{con} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

donde $(\Delta \bar{Q} / \bar{V})''$ y $(\Delta Q_{con} / V_{con})''$ indican que el lado izquierdo del vector ha sido procesado y la matriz B''' es la nueva matriz B'' después de la triangularización.

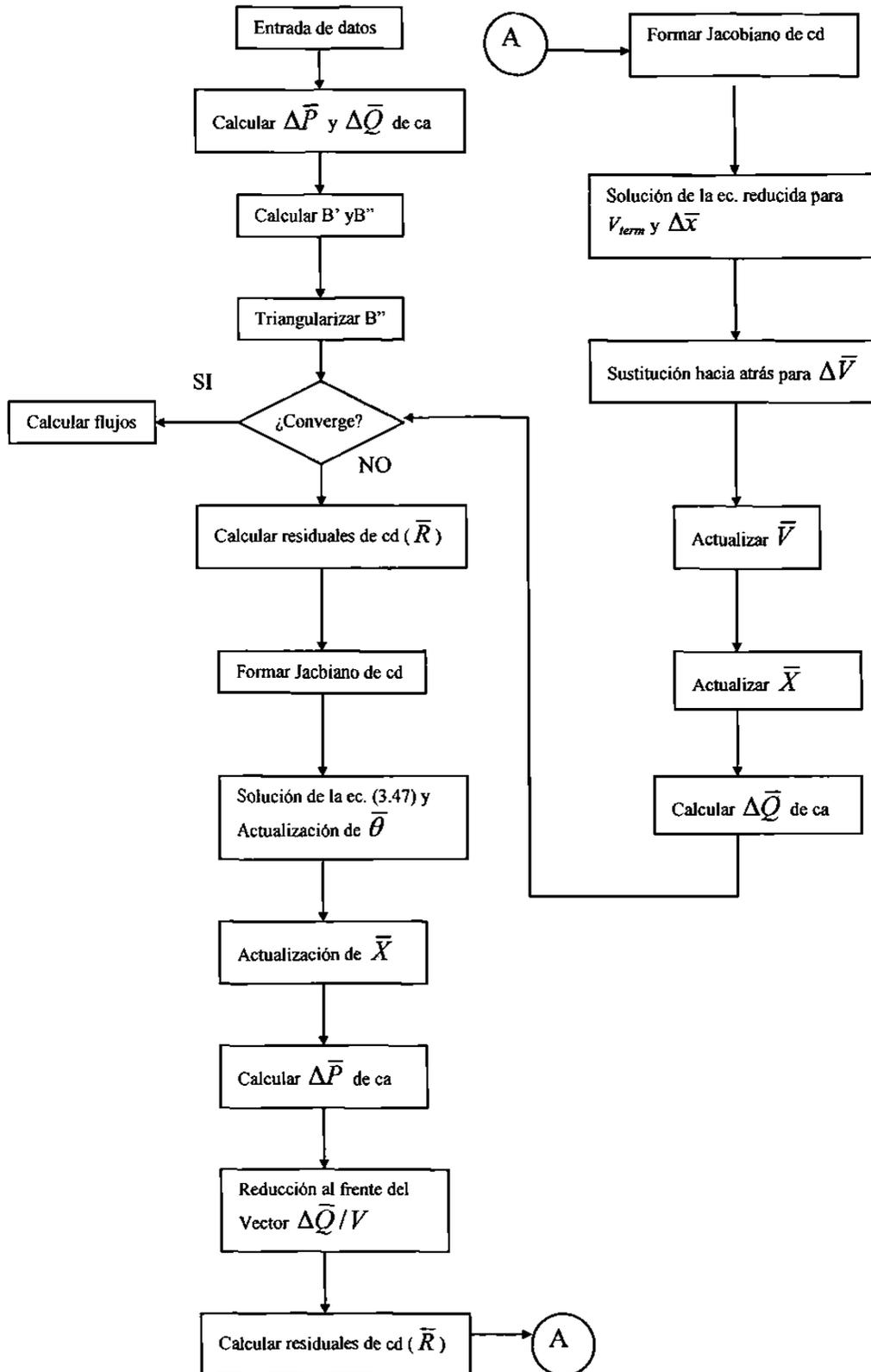


Figura 3.6 Diagrama de bloques del método unificado.

El procesamiento de $\Delta\bar{Q}$ indicado en la ecuación se realiza con el proceso estándar de sustitución hacia delante usado en cada iteración.

Las ecuaciones del convertidor de cd pueden ser combinadas con la ecuación (3.52) como sigue:

$$\left[\begin{array}{c} (\Delta\bar{Q}/\bar{V})'' \\ \left(\frac{\Delta Q_{con}}{V_{con}} \right)' + \frac{\Delta Q_{con}(cd)}{V_{con}} \\ \bar{R} \end{array} \right] = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & B''' & 0 \\ \hline 0 & B''_u + B''_u(cd) & AA'' \\ \hline 0 & BB'' & A \\ \hline \end{array} \left[\begin{array}{c} \Delta\bar{V} \\ \Delta V_{con} \\ \Delta\bar{x} \end{array} \right] \quad (3.53)$$

donde

$$B''_u(cd) = \frac{1}{V_{con}} [\partial Q_{con}(cd) / \partial V_{con}]$$

La sección resultante

$$\left[\begin{array}{c} \left(\frac{\Delta Q_{con}}{V_{con}} \right)' + \frac{\Delta Q_{con}(cd)}{V_{con}} \\ \bar{R} \end{array} \right] = \begin{array}{|c|c|} \hline B''_u + B''_u(cd) & AA'' \\ \hline BB'' & A \\ \hline \end{array} \left[\begin{array}{c} \Delta V_{con} \\ \Delta\bar{x} \end{array} \right] \quad (3.54)$$

puede ser entonces resuelta por cualquier método deseado para matrices no simétricas.

Los valores de $\Delta\bar{x}$ y ΔV_{con} son obtenidos y ΔV_{con} es usado en el proceso de sustitución hacia atrás para determinar los restantes $\Delta\bar{V}$, o sea la ecuación (3.52) es resuelta para $\Delta\bar{V}$.

3.7.3 Método secuencial

El método secuencial resulta de una simplificación del método unificado, donde las ecuaciones del sistema de ca son resueltas mediante el sistema de cd como una inyección de potencia activa y reactiva en el nodo del convertidor apropiado. A su vez, para la solución de cd el sistema de ca es modelado como un voltaje constante en el nodo convertidor.

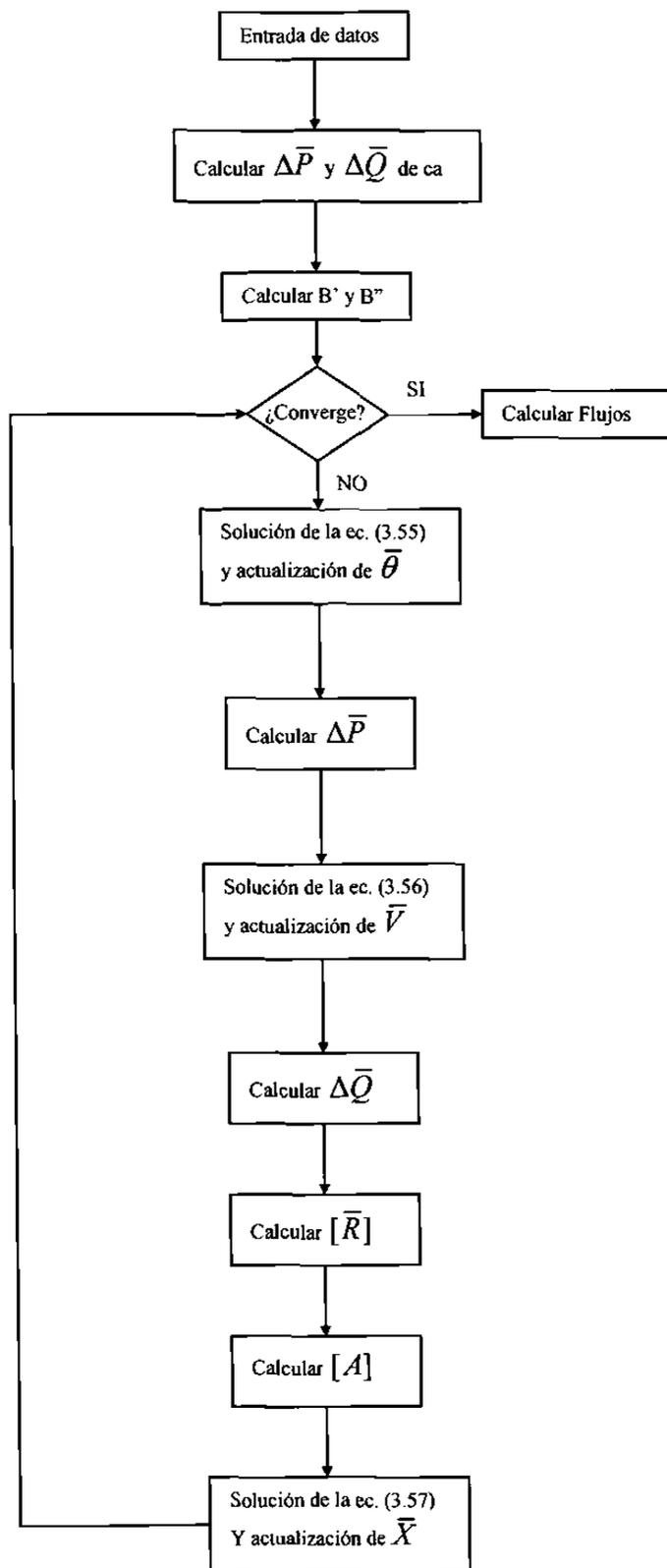


Figura 3.7. Diagrama de bloques del método secuencial $P-Q-CD$.

Las siguientes tres ecuaciones son resueltas iterativamente hasta obtener la convergencia.

$$[\Delta \bar{P} / \bar{V}] = [B'] [\Delta \bar{\theta}] \quad (3.55)$$

$$[\Delta \bar{Q} / \bar{V}] = [B''] [\Delta \bar{V}] \quad (3.56)$$

$$[\bar{R}] = [A] [\Delta \bar{x}] \quad (3.57)$$

Esta secuencia de iteración, referida como “*P-Q-CD*”, está ilustrada en el diagrama de bloques de la figura 3.7 y puede ser resumido como sigue;

- (i) Calcular $\Delta \bar{P} / \bar{V}$, resolver la ecuación (3.55) y actualizar $\bar{\theta}$.
- (ii) Calcular $\Delta \bar{Q} / \bar{V}$, resolver la ecuación (3.56) y actualizar \bar{V} .
- (iii) Calcular los residuales de *cd* \bar{R} , resolver la ecuación (3.57) y actualizar \bar{x} .
- (iv) Regresar a (i).

En el método secuencial las ecuaciones de *cd* no necesitan ser resueltas en todo el proceso iterativo. Una vez que los residuales de *cd* han convergido, el sistema de *cd* puede ser modelado simplemente como inyecciones fijas de potencia activa y reactiva en el nodo terminal del convertidor. Los residuales de *cd* deben ser verificados después de cada iteración de *ca* para asegurar que el sistema de *cd* cumple con el criterio de convergencia.

Sin embargo, para establecer una comparación entre el algoritmo unificado y el secuencial las ecuaciones de *cd* se continúan resolviendo hasta que los sistemas de *ca* y *cd* han convergido. Esto asegura que la técnica secuencial es un paralelo exacto del correspondiente algoritmo unificado.

Alternativamente, las ecuaciones de *cd* podrían ser resueltas después de cada iteración de potencia activa, así como de la potencia reactiva y la secuencia resultante es referida como *P, CD, Q, CD*. Como en los métodos previos, las ecuaciones de *cd* son resueltas hasta que todos los desajustes estén dentro de la tolerancia.

3.8 RESUMEN

En este capítulo se mostraron los conceptos básicos de los estudios de flujos de potencia con los métodos de Newton-Raphson y desacoplado rápido.

Se mostraron los conceptos básicos de la formulación de flujos de potencia ca-cd, se desarrolló el modelo de las estaciones convertidoras y la incorporación de las ecuaciones de control que definen los modos de control en la operación.

Se desarrollaron algoritmos de flujos de potencia para sistemas ca-cd usando el método unificado y el método secuencial.

CAPÍTULO 4

INCORPORACIÓN DEL MODELO DE UN ENLACE ASÍNCRONO BTB EN UN ESTUDIO DE FLUJOS

4.1 INTRODUCCIÓN

El enlace asíncrono BTB es un caso especial de enlaces en HVDC donde la estación convertidora está en la misma estación y no existe una línea de transmisión entre ella. Con la nueva tecnología^{[16][15]} es posible realizar funciones adicionales a las clásicas, es decir, además del control de la potencia es posible también el control del voltaje.

4.2 MODELADO DEL ENLACE “BACK TO BACK”

4.2.1 Modos de control

El modelo del esquema BTB incorpora tres modos de control básicos, estos son:

1. BTB en Modo de Control de Potencia

En este modo el BTB transmitirá la potencia activa al nivel seleccionado. La potencia reactiva aportada por la estación convertidora será cero mientras el voltaje esté dentro de la banda especificada.

2. BTB en Modo de Control de Voltaje

En este modo, el BTB opera básicamente en la misma forma que el Modo de Control de Potencia, el voltaje se especifica en los nodos extremos y el BTB aporta la potencia reactiva requerida.

3. BTB como Compensador Estático de Vars (STATCOM)

La potencia activa a través del BTB es cero y los nodos extremos se comportan como controladores de voltaje.

4.2.2 Modelo del modo de control de potencia

El modelo del BTB se presenta en base a la figura 4.1.

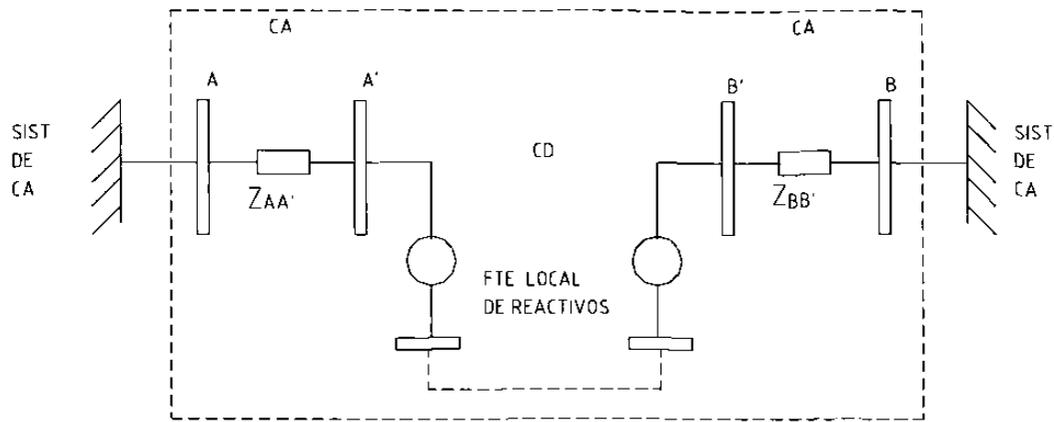


Figura 4.1. Modelo del BTB.

En el modelo de la figura 4.1, los nodos A' y B' tienen una fuente local de reactivos y se requiere transmitir potencia activa entre A' y B'.

Como no se consideran pérdidas entre A' y B', entonces las inyecciones de potencia en cada nodo son:

$$\begin{aligned} P_{A'} &= P_{B'} \\ P_{A'} - P_{B'} &= 0 \end{aligned} \quad (4.1)$$

y

$$\begin{aligned} P_{A'} &= P_{A'}^{sp} \\ P_{A'} - P_{A'}^{sp} &= 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

El flujo a través del BTB se modela entonces como una inyección de potencia en los nodos.

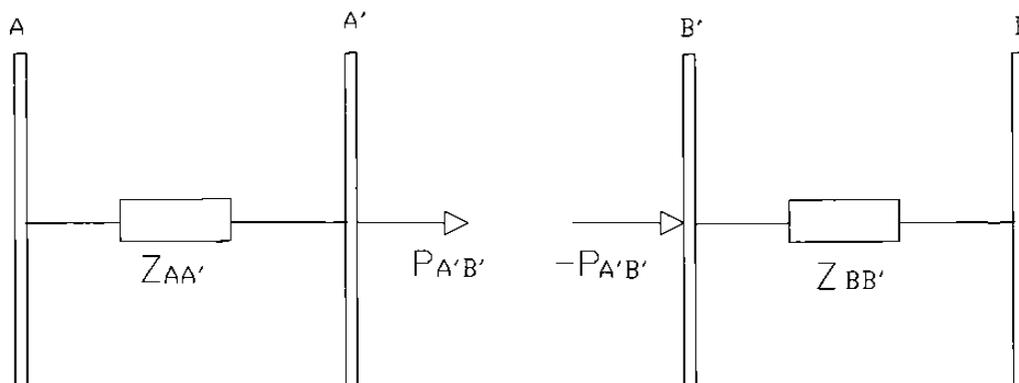


Figura 4.2. Flujo a través del BTB modelado como inyecciones de potencia en los nodos conectados al BTB.

Para simular un enlace BTB entre dos nodos de un sistema o entre dos nodos de diferentes sistemas, se procede de la siguiente manera:

Supongamos que entre los nodos A y B no tenemos ningún tipo de conexión o enlace y deseamos conectar un BTB, entonces el modelado consiste en sustituir los nodos a enlazar (A y B) por el modelo del BTB que consta de cuatro nodos y dos fuentes reactivos (figura 4.1).

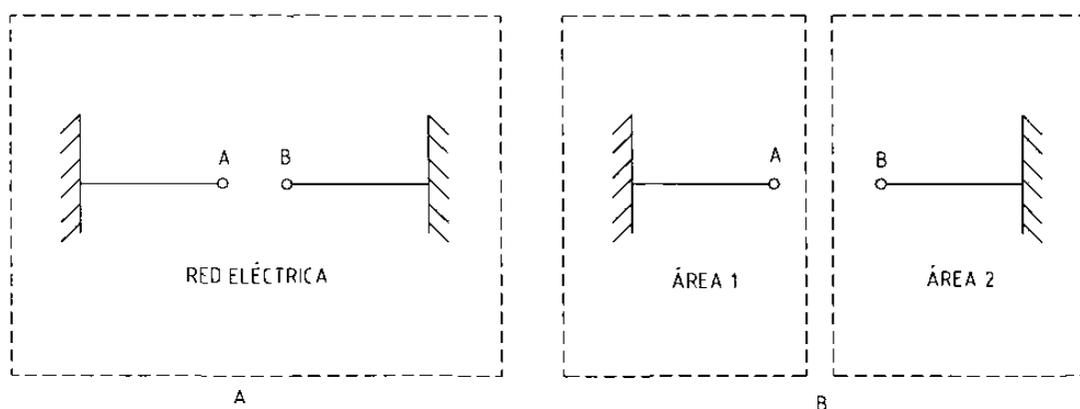


Figura 4.3. (A) Los nodos A y B pertenecen al mismo sistema, (B) los nodos A y B pertenecen a sistemas aislados entre sí.

Si entre A y B no se tenía conexión alguna, entonces el jacobiano a partir de ellos es:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_A \\ \Delta Q_A \\ \Delta P_B \\ \Delta Q_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_A}{\partial \theta_A} & \frac{\partial P_A}{\partial V_A} & \frac{\partial P_A}{\partial \theta_B} & \frac{\partial P_A}{\partial V_B} \\ \frac{\partial Q_A}{\partial \theta_A} & \frac{\partial Q_A}{\partial V_A} & \frac{\partial Q_A}{\partial \theta_B} & \frac{\partial Q_A}{\partial V_B} \\ \frac{\partial P_B}{\partial \theta_A} & \frac{\partial P_B}{\partial V_A} & \frac{\partial P_B}{\partial \theta_B} & \frac{\partial P_B}{\partial V_B} \\ \frac{\partial Q_B}{\partial \theta_A} & \frac{\partial Q_B}{\partial V_A} & \frac{\partial Q_B}{\partial \theta_B} & \frac{\partial Q_B}{\partial V_B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_A \\ \Delta V_A \\ \Delta \theta_B \\ \Delta V_B \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

En el caso de que no exista conexión directa entre A y B los elementos mutuos entre ellos serían cero.

4.2.2.1 Incorporación del BTB

Si los nodos A y B forman parte de dos sistemas independientes, entonces se tendría un jacobiano en las dos áreas desacopladas y cada una con su propio nodo compensador. Entonces, el jacobiano tendría la siguiente estructura:

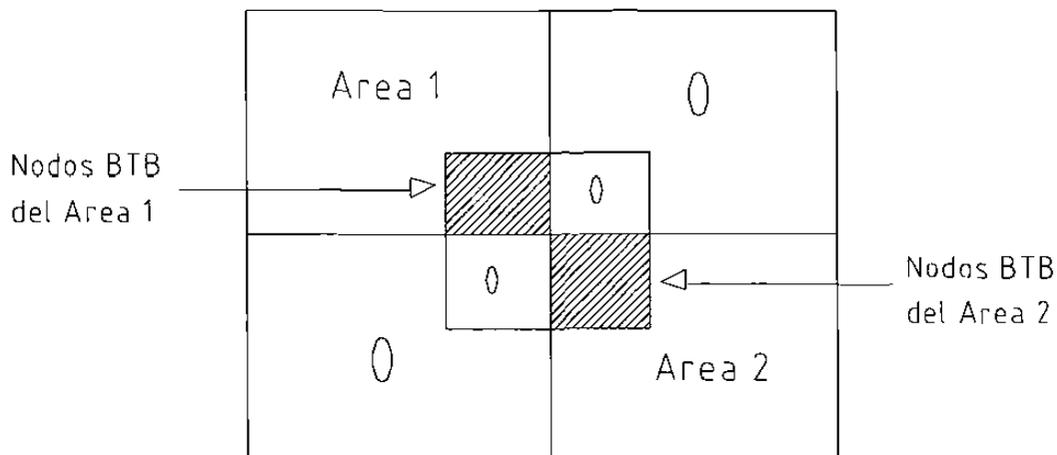


Figura 4.4. Jacobiano de dos áreas aisladas entre si enlazadas por un BTB.

Dado que la incorporación del modelo del esquema BTB en modo de control de potencia consiste en anexas dos nodos de carga más, entonces el jacobiano crece en cuatro

columnas y cuatro renglones más para este modo de control. Con esto el jacobiano entre A y B que era de 4 x 4 (suponiendo A y B nodos de carga) se extiende a un jacobiano de 8 x 8.

Nodo	Variable	
	Conocidas	Desconocidas
A	P, Q	V, θ
A'	P, Q,	V, θ
B	P, Q	V, θ
B'	P Q,	V, θ

Tabla 4.1. Variables en los nodos terminales de un enlace BTB.

4.2.3 Modelo del modo de control de voltaje

En el modelo de la figura 4.1, en los nodos A' y B' se tiene una fuente local de reactivos y se requiere controlar el voltaje de A y B y la potencia entre A' y B'.

El control de voltaje se realiza en la forma siguiente:

Los nodos A y B son nodos de carga, pero en ellos se conoce el voltaje (nosotros lo fijamos), por lo tanto en estos nodos tenemos para el jacobiano, ecuaciones de P y Q (dado que son nodos de carga) y como incógnita tenemos los ángulos θ_A y θ_B respectivamente.

Los nodos A' y B' son nodos de voltaje controlado ya que se tiene una fuente local de reactivos en cada uno de ellos, pero dado que el voltaje se controla en los nodos A y B y no en A' y B', entonces se tiene como incógnita el voltaje ($V_{A'}$ y $V_{B'}$) y los ángulos ($\theta_{A'}$ y $\theta_{B'}$) y sólo se tiene la ecuación de P .

Los voltajes en A y B serían:

$$\begin{aligned}
 V_A &= V_A^{sp} \\
 V_A - V_A^{sp} &= 0
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

y

$$\begin{aligned}
 V_B &= V_B^{sp} \\
 V_B - V_B^{sp} &= 0
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

El control de potencia se hace al simular la potencia de cd como inyecciones en los nodos A' y B'(figura 4.1), y partiendo de la ecuación (4.3), tenemos que los nodos del BTB en los que se conecta el sistema de *ca* son modelados como nodos de voltaje controlado. En el jacobiano esto se ve reflejado al anexar dos nodos de voltaje controlado, entonces el jacobiano crece en dos columnas y dos renglones más para este modo de control. Con esto el jacobiano entre A y B que era de 4 x 4 (suponiendo A y B nodos de carga) se extiende a un jacobiano de 6 x 6.

La modificación adicional en el jacobiano es que en los nodos A y B se controla el voltaje, por tanto en estos nodos se tiene una incógnita (ángulo θ) y dos ecuaciones (P y Q), mientras que en los nodos A'y B' que son de voltaje controlado, se necesita encontrar un voltaje necesario para mantener los voltajes especificados en A y B, en otras palabras, tenemos como incógnita el voltaje V y el ángulo θ y tenemos una ecuación (P), la tabla 4.2 explica esta situación.

En la figura 4.5 detalla la incorporación del enlace BTB en el Jacobiano; dado el cambio de las incógnitas $\Delta V_{A'}$ y $\Delta V_{B'}$ en lugar de ΔV_A y ΔV_B respectivamente ocasiona una modificación en las columnas 2 y 5 del Jacobiano.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_A \\ \Delta Q_A \\ \Delta P_{A'} \\ \Delta P_B \\ \Delta Q_B \\ \Delta P_{B'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_A}{\partial \theta_A} & \frac{\partial P_A}{\partial V_{A'}} & \frac{\partial P_A}{\partial \theta_{A'}} & \frac{\partial P_A}{\partial \theta_B} & \frac{\partial P_A}{\partial V_{B'}} & \frac{\partial P_A}{\partial \theta_{B'}} \\ \frac{\partial Q_A}{\partial \theta_A} & \frac{\partial Q_A}{\partial V_{A'}} & \frac{\partial Q_A}{\partial \theta_{A'}} & \frac{\partial Q_A}{\partial \theta_B} & \frac{\partial Q_A}{\partial V_{B'}} & \frac{\partial Q_A}{\partial \theta_{B'}} \\ \frac{\partial P_{A'}}{\partial \theta_A} & \frac{\partial P_{A'}}{\partial V_{A'}} & \frac{\partial P_{A'}}{\partial \theta_{A'}} & \frac{\partial P_{A'}}{\partial \theta_B} & \frac{\partial P_{A'}}{\partial V_{B'}} & \frac{\partial P_{A'}}{\partial \theta_{B'}} \\ \frac{\partial P_B}{\partial \theta_A} & \frac{\partial P_B}{\partial V_{A'}} & \frac{\partial P_B}{\partial \theta_{A'}} & \frac{\partial P_B}{\partial \theta_B} & \frac{\partial P_B}{\partial V_{B'}} & \frac{\partial P_B}{\partial \theta_{B'}} \\ \frac{\partial Q_B}{\partial \theta_A} & \frac{\partial Q_B}{\partial V_{A'}} & \frac{\partial Q_B}{\partial \theta_{A'}} & \frac{\partial Q_B}{\partial \theta_B} & \frac{\partial Q_B}{\partial V_{B'}} & \frac{\partial Q_B}{\partial \theta_{B'}} \\ \frac{\partial P_{B'}}{\partial \theta_A} & \frac{\partial P_{B'}}{\partial V_{A'}} & \frac{\partial P_{B'}}{\partial \theta_{A'}} & \frac{\partial P_{B'}}{\partial \theta_B} & \frac{\partial P_{B'}}{\partial V_{B'}} & \frac{\partial P_{B'}}{\partial \theta_{B'}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_A \\ \Delta V_{A'} \\ \Delta \theta_{A'} \\ \Delta \theta_B \\ \Delta V_{B'} \\ \Delta \theta_{B'} \end{bmatrix}$$

Figura 4.5. Jacobiano entre los nodos A y B de un sistema cualquiera o de dos sistemas independientes al unirse por medio de un BTB en modo de control de voltaje.

Nodo	Variable	
	Conocidas	Desconocidas
A	P, Q, V	θ
A'	P	Q, V, θ
B	P, Q, V	θ
B'	P	Q, V, θ

Tabla 4.2. Variables en los nodos terminales de un enlace BTB.

4.2.4 Modelo del modo de control STATCOM

El modelo del esquema BTB en modo de control STATCOM es similar al modo de control de voltaje, pero la potencia activa transmitida a través del enlace es cero.

4.2.5 Caso general para la incorporación del modelo del esquema BTB en el problema de flujos de potencia

Para la incorporación de dos o más esquemas BTB en el algoritmo de flujos de potencia se procede de manera similar que en las secciones 4.2.2 y 4.2.3, dependiendo del modo de control deseado, y se tendría que repetir el proceso de la incorporación del modelo entre dos nodos tantas veces como esquemas BTB existan en el sistema. La figura 4.6 representa el esquema de un jacobiano con dos BTB en el sistema.

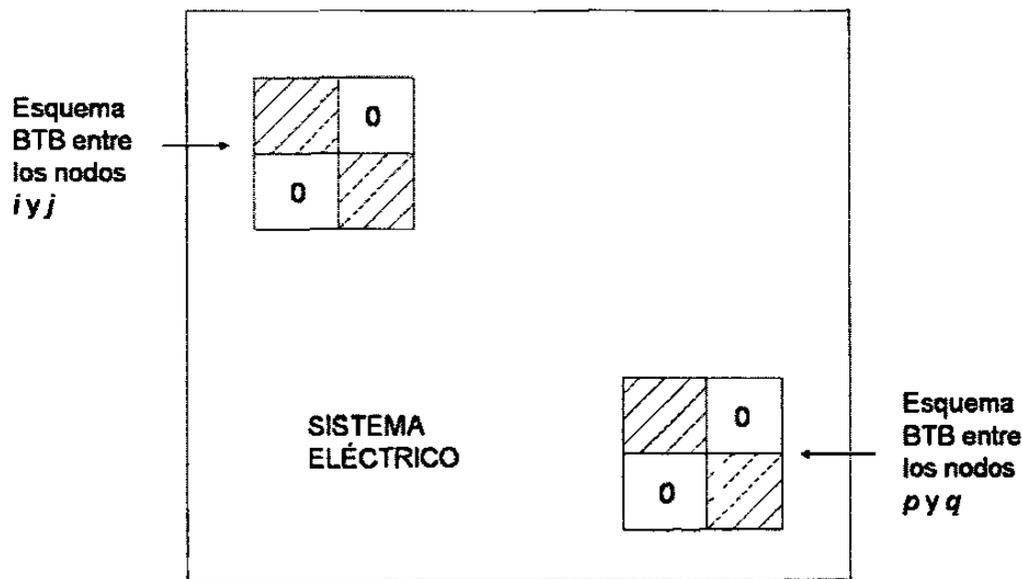


Figura 4.6. Jacobiano incluyendo dos esquemas BTB en el estudio de flujos de potencia.

4.2.6 Algoritmos para flujos de potencia ca-cd incluyendo el esquema BTB

Se plantean dos algoritmos elaborados en MATLAB[®], el primero de ellos considera al enlace asíncrono (BTB) en paralelo con una línea de ca (figura 4.7); mientras que el segundo de ellos consiste en la solución de dos sistemas aislados, que se enlazan por medio del dispositivo BTB (figura 4.8).

En estos algoritmos se propone una rutina para la formación de la matriz Jacobiana sin considerar el dispositivo BTB, y otra diferente en la que se incorpora el modelo del esquema BTB (figuras 4.7 y 4.8).

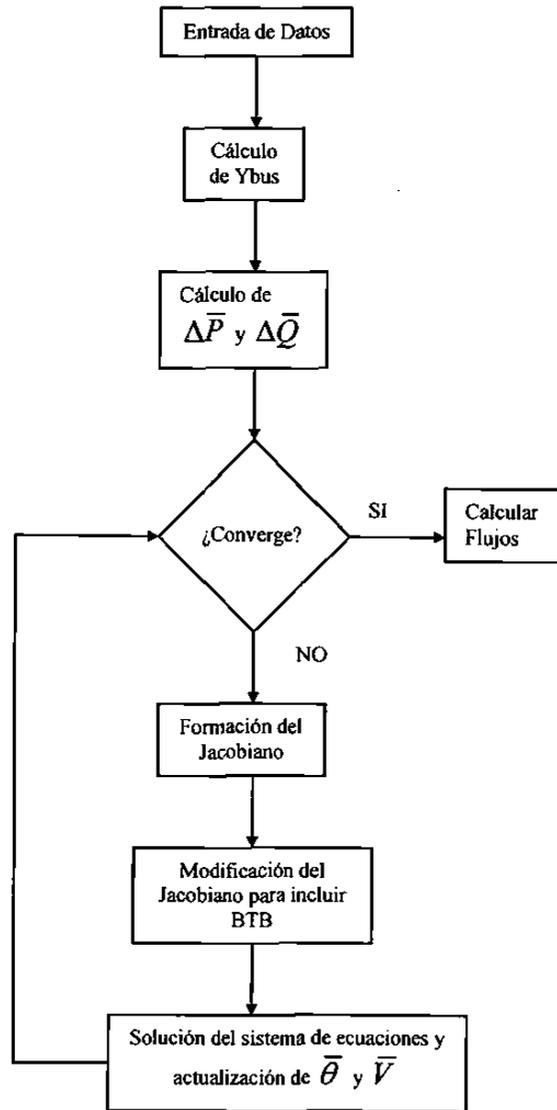


Figura 4.7. Diagrama de bloques para flujos de potencia *ca-cd* incluyendo el dispositivo BTB como enlace asíncrono en paralelo con enlace síncrono.

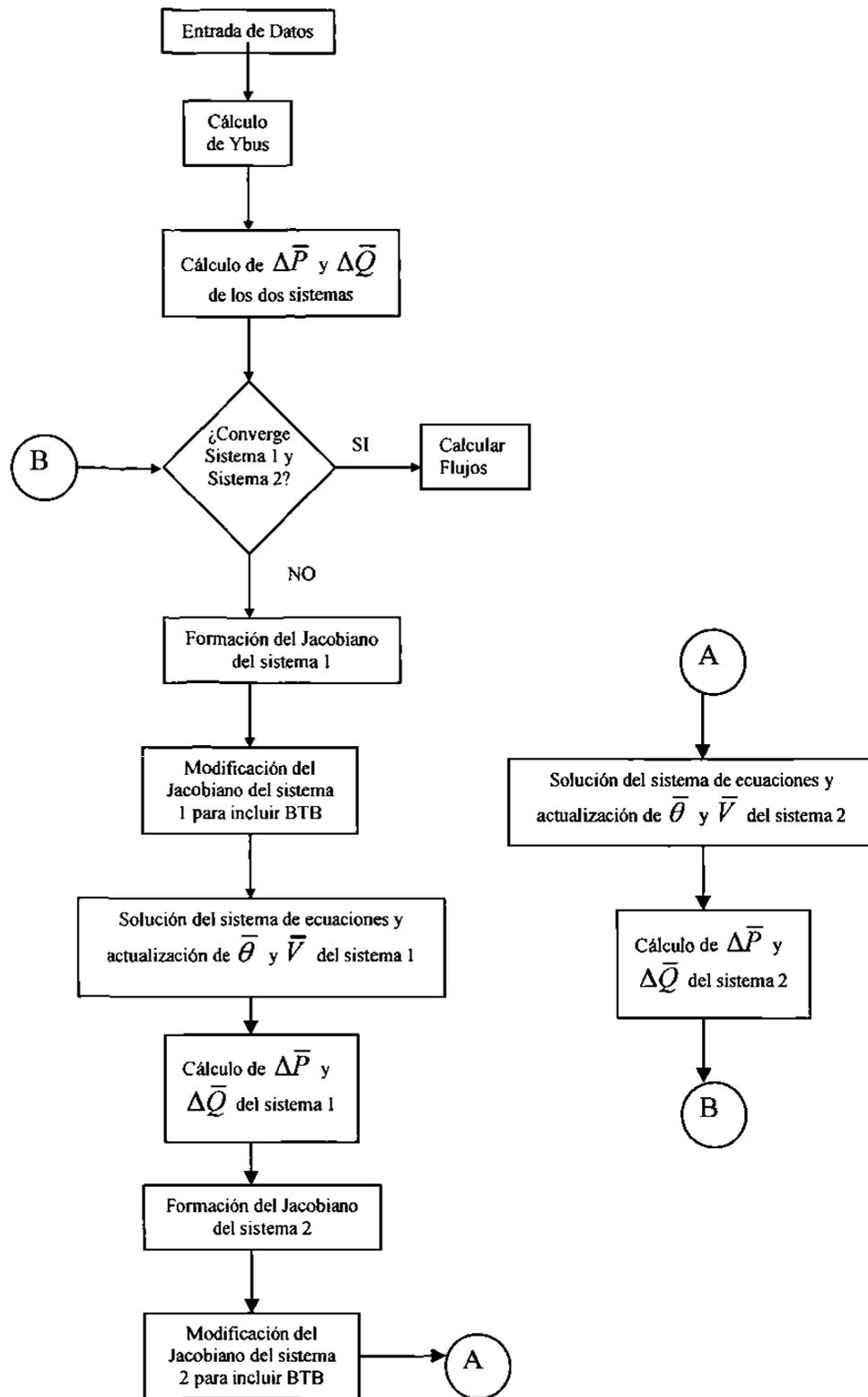


Figura 4.8 Diagrama de bloques para flujos de potencia *ca-cd* incluyendo el dispositivo BTB como enlace asíncrono.

4.3 RESUMEN

En este capítulo se modeló e incorporó el esquema BTB y los diferentes modos de control en el estudio de flujos de potencia en *ca*.

Se desarrolló una metodología para la incorporación del modelo de la estación convertidora BTB al jacobiano del sistema de *ca*.

Se desarrollaron los algoritmos para flujos de potencia en sistemas *ca-cd* incluyendo el esquema BTB, ya sea como enlace asíncrono o conectado en paralelo con una línea de *ca*. Los algoritmos desarrollados no incluyen el modelo de los dispositivos electrónicos de la estación BTB.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS DE SIMULACIÓN DIGITAL SOBRE DIFERENTES REDES DE PRUEBA

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos con los algoritmos computacionales desarrollados para evaluar flujos de potencia en sistemas integrados ca-cd. Así mismo se presentan resultados de la incorporación del esquema BTB en sistemas de prueba.

En los estudios con estaciones convertidoras de ca-cd se desarrollaron varios algoritmos; el primero es el método secuencial donde resuelve “por separado” el sistema de *ca* independiente del sistema de *cd*; el otro es el método unificado, el cual resuelve simultáneamente los sistemas de *ca* y *cd*. A su vez, el método unificado tiene dos variantes; uno es el método unificado P-QCD en el estudio de flujos con el método desacoplado rápido, este método tiene iteraciones para *P* y *Q*, pero sólo dentro de la matriz *B* se incorpora el modelo del sistema de *cd* para ser resuelto junto con las variables que influyen en *Q*; y el segundo es algoritmo unificado PCD-QCD, donde el modelo del sistema de *cd* es incorporado dentro de las matrices *B'* y *B''*. También se hacen modificaciones a los algoritmos para simular casos de enlaces asíncronos y enlaces síncronos en paralelo con asíncronos.

Los algoritmos en donde se incorpora el esquema BTB también están clasificados según el sistema y la conexión utilizada.

Las redes utilizadas para los diferentes casos se proponen con parámetros típicos de líneas, transformadores y generadores, los algoritmos fueron elaborados en MATLAB® versión 5.3.

5.2 ESTUDIOS DE FLUJOS CA-CD POR EL MÉTODO SECUENCIAL

Para los casos estudiados en el convertidor 1 (rectificador) se controla la potencia en el enlace de corriente directa (P_{cd}) y el ángulo de disparo α , en el convertidor 2 (inversor) se controla el voltaje V_{cd} y el ángulo de extinción γ .

Los datos de los sistemas analizados se anexan en el Apéndice C.

Caso 1. Enlace asíncrono

Consiste en dos sistemas de ca enlazados por una línea de cd (enlace asíncrono). Se toman los datos de la sección C.1. Se presentan tres casos para diversos niveles de transmisión en el enlace de cd:

- 0 MW
- 50 MW
- 100 MW

Parámetros de control	Convertidor 1	Convertidor 2
Potencia en el enlace de cd	0/50/100 MW	
α	7.0 grados	
γ		10.0 grados
V_{cd}		- 1.05 pu

Tabla 5.1. Parámetros de control del subsistema de cd

$$R_{cd} = 0.00334 \text{ pu}$$

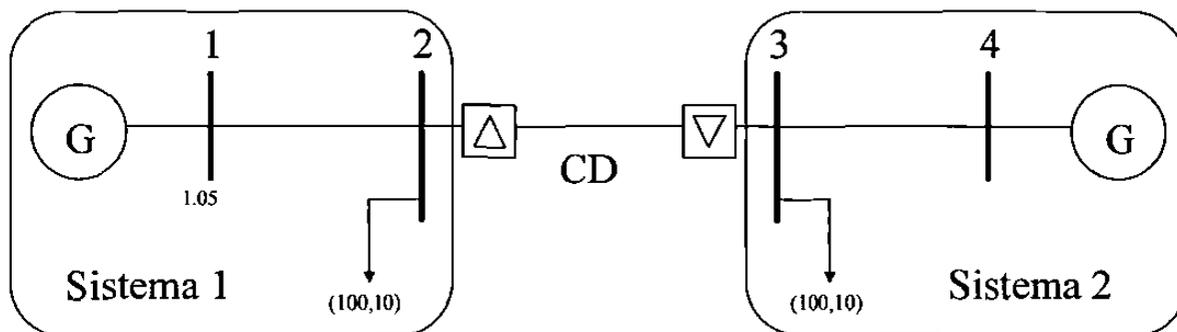


Figura 5.1 Diagrama de la red 1 para el caso 1. Enlace asíncrono.

5.2.1 RESULTADOS EN EL CASO DE ESTUDIO.

a). 0 MW a través de la línea de cd

El sistema 1 convergió en 6 iteraciones de P y 6 iteraciones de Q

El sistema 2 convergió en 5 iteraciones de P y 4 iteraciones de Q

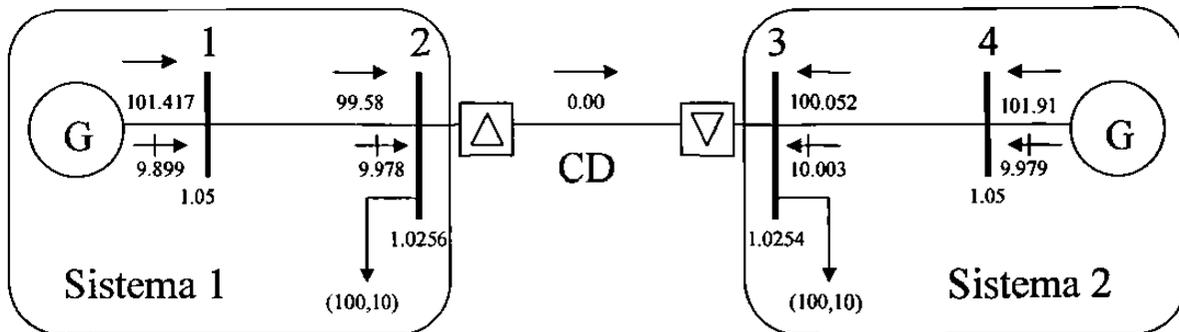


Figura 5.2 Línea de cd transmitiendo 0 MW.

Sistema de cd

Convertidor	Vcd	Icd	Tap	Alfa/gama
1	1.05	0.00	0.7683	7.0
2	-1.05	0.00	0.7737	10.0

Tabla 5.2. Resultados del subsistema de cd. Pcd = 0 MW.

b) 50 MW a través de la línea de cd

El sistema 1 convergió en 6 iteraciones de P y 4 iteraciones de Q

El sistema 2 convergió en 8 iteraciones de P y 6 iteraciones de Q

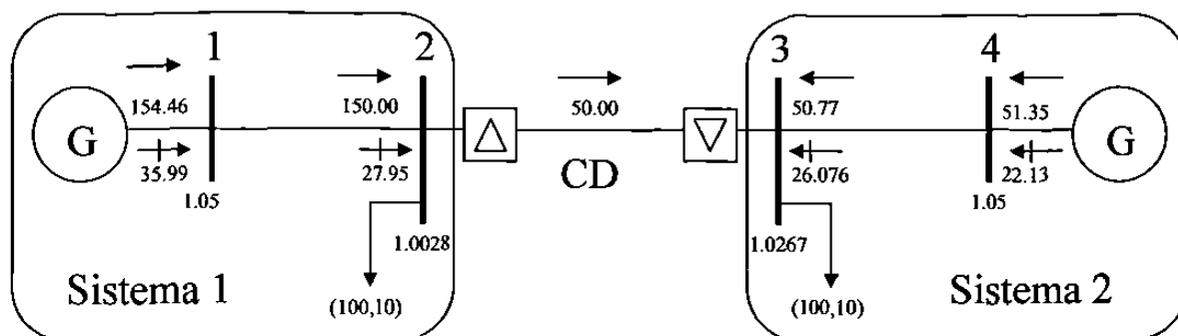


Figura 5.3 Línea de cd transmitiendo 50 MW.

Sistema de cd

Convertidor	Vcd	Icd	Tap	Alfa/gama
1	1.0516	0.4755	0.8291	7.0
2	-1.05	0.4755	0.9961	10.0

Tabla 5.3. Resultados del subsistema de cd. Pcd = 50 MW

c) 100 MW a través de la línea de cd.

El sistema 1 convergió en 5 iteraciones de P y 7 iteraciones de Q

El sistema 2 convergió en 11 iteraciones de P y 9 iteraciones de Q

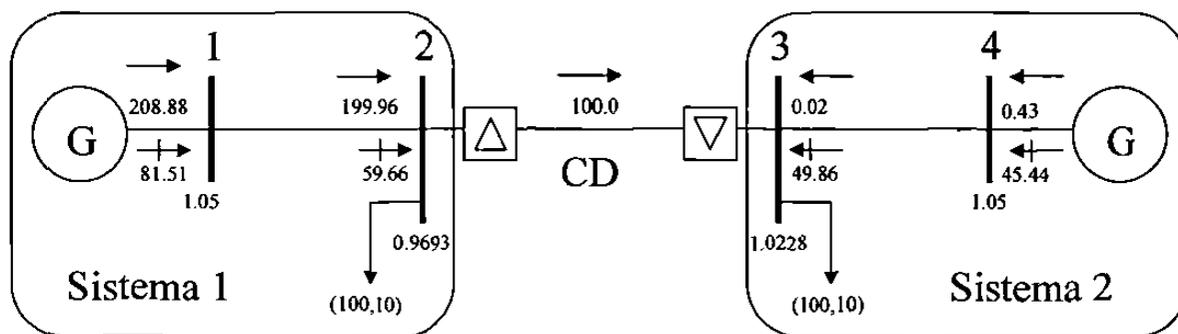


Figura 5.4 Línea de cd transmitiendo 100 MW

Sistema de *cd*

Convertidor	V _{cd}	I _{cd}	Tap	Alfa/gama
1	1.0532	0.9495	0.9032	7.0
2	-1.05	0.9495	0.8256	10.0

Tabla 5.4. Resultados del subsistema de *cd*. P_{cd} = 100 MW

Caso 2. Enlace de *ca* y *cd* en paralelo

Consiste en un sistema en donde operan en paralelo una línea de *ca* con una línea de *cd*. Se toman los datos de la sección C.2 del apéndice C. Se simulan tres casos con diferente nivel de transmisión en los enlaces de *cd*:

- 0 MW
- 50 MW
- 100 MW

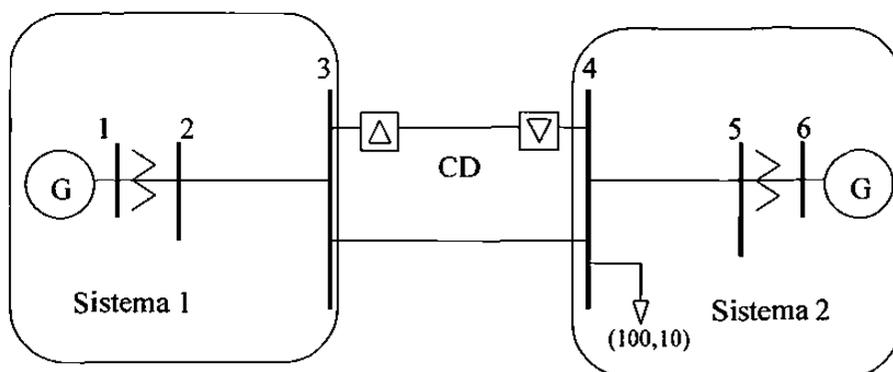


Figura 5.5. Diagrama de la red 2 para el caso 2. Enlace de *ca* y *cd* operando en paralelo.

a) 0 MW a través de la línea de cd

El estudio convergió en 7 iteraciones de P y 6 iteraciones de Q

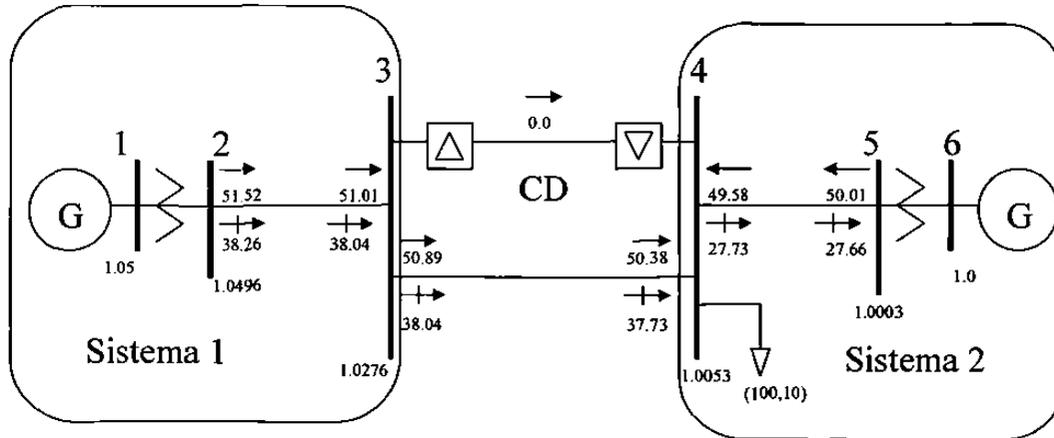


Figura 5.6. Línea de cd transmitiendo 0 MW en paralelo con línea de ca.

Sistema de *cd*

Convertidor	V _{cd}	I _{cd}	Tap	Alfa/gama
1	1.05	0.0	0.7661	7.0
2	-1.05	0.0	0.7893	10.0

Tabla 5.5. Resultados del subsistema de cd en paralelo. P_{cd} = 0 MW

b) 50 MW a través de la línea de cd

El estudio convergió en 7 iteraciones de P y 6 iteraciones de Q

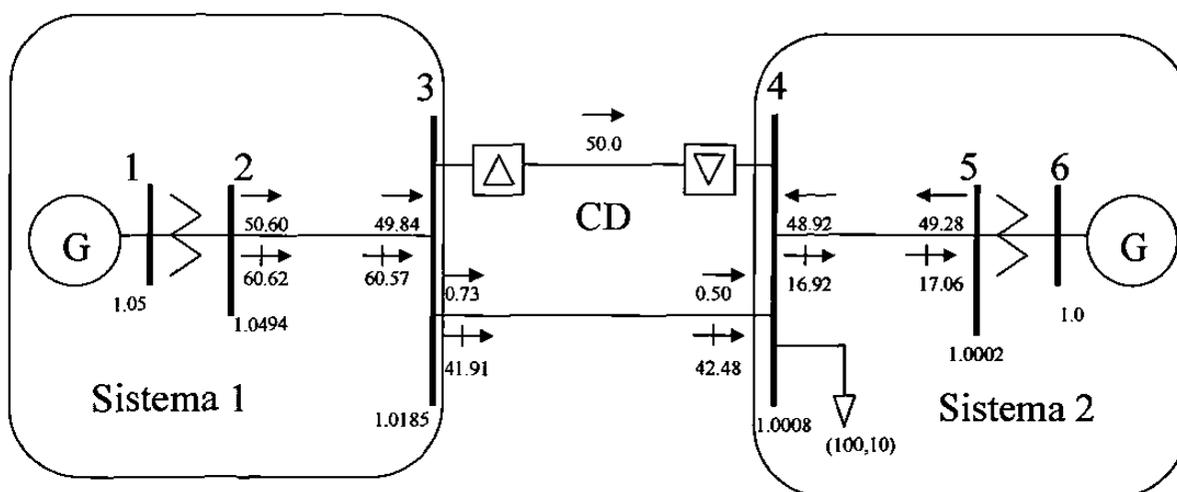


Figura 5.7. Línea de cd transmitiendo 50 MW en paralelo con línea de ca

Sistema de *cd*

Convertidor	V _{cd}	I _{cd}	Tap	Alfa/gama
1	1.0516	0.4755	0.8173	7.0
2	-1.05	0.4755	0.8188	10.0

Tabla 5.6. Resultados del subsistema de cd en paralelo. P_{cd} = 50 MW

c) 100 MW a través de la línea de cd

El estudio convergió en 6 iteraciones de P y 7 iteraciones de Q

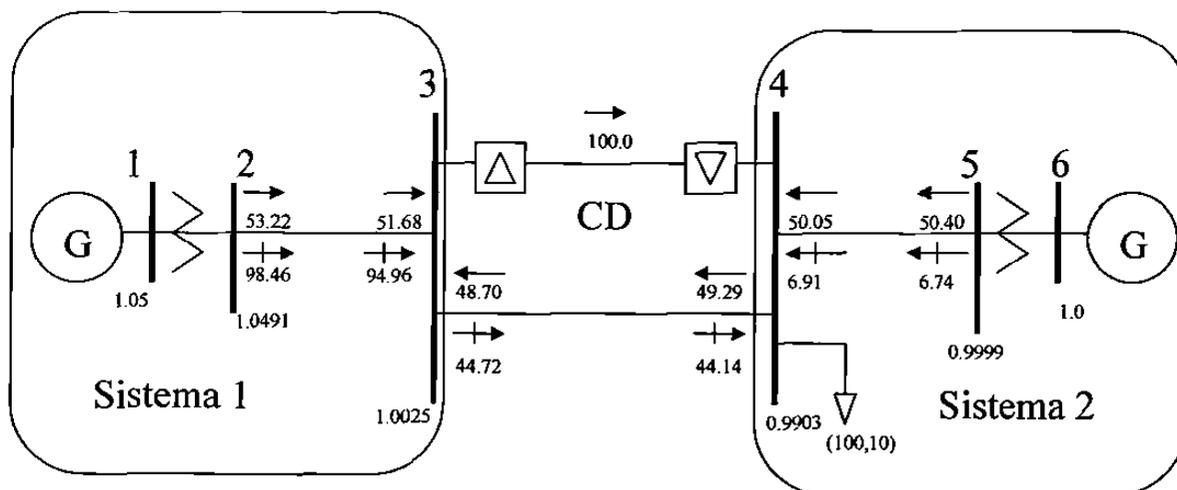


Figura 5.8. Línea de cd transmitiendo 100 MW en paralelo con línea de ca

Sistema de *cd*

Convertidor	V _{cd}	I _{cd}	Tap	Alfa/gama
1	1.0532	0.9495	0.8726	7.0
2	-1.05	0.9495	0.8511	10.0

Tabla 5.7. Resultados del subsistema de cd en paralelo. P_{cd} = 100 MW

5.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El enlace de *cd* permite un control total en el flujo de potencia entre los sistemas. Al aumentar el flujo desde 0 MW hasta 100 MW se puede observar lo siguiente:

- ✓ En el caso donde se modela un enlace asíncrono entre los sistemas, se observa que el sistema 2 que importa energía, converge en un número mayor de iteraciones.
- ✓ Los voltajes de *ca* en los nodos convertidores disminuye debido a que la estación convertidora requiere potencia reactiva.

- ✓ En el caso donde existe un enlace de *ca* en paralelo con el de *cd*, se observa que el número de iteraciones es prácticamente el mismo en los tres casos.
- ✓ Los voltajes de *ca* de los convertidores se comportan de manera similar en el caso del enlace asíncrono.
- ✓ Al tener la facilidad de controlar el flujo en la línea de *cd*, “automáticamente” se controla el flujo en la línea de *ca* que está en paralelo; en el inciso a) se observa que al no transmitir por la línea de *cd*, se transmite el 100% por la línea de *ca*; en el inciso b) se transmite el 100% por la línea de *cd* y en el inciso c) por la línea de *cd* se transmiten 50 MW más de los requeridos, los cuales regresan por la línea de *ca*. Por lo cual es posible controlar el flujo en magnitud y dirección en el enlace de *ca*.
- ✓ De los resultados de la tabla 5.9 podemos observar que entre mayor es el ángulo de disparo, el consumo de reactivos por la estación convertidora es mayor.

CASOS	Enlace asíncrono				Enlace en CD y CA en paralelo		
	No. de iteraciones de P y Q		Requisito de reactivos en el rectificador [MVAR]	Requisito de reactivos en el inversor [MVAR]	No. de iteraciones de P y Q	Requisito de reactivos en el rectificador [MVAR]	Requisito de reactivos en el inversor [MVAR]
	Sistema 1	Sistema 2					
0 MW	6, 6	5, 4	0.0	0.0	7, 6	0.0	0.0
50 MW	6, 4	8, 6	17.92	15.32	7, 6	18.12	15.75
100 MW	5, 7	11, 9	49.76	40.84	6, 7	49.57	40.29

Tabla 5.8. Número de iteraciones y consumo de reactivos para los casos de enlace asíncrono y enlace en *cd* y *ca* en paralelo con el método secuencial.

En la tabla 5.9 se muestran varios casos en donde se varía el ángulo de disparo del convertidor mientras se mantiene fijo el flujo a través del enlace de *cd* (100 MW).

Ángulo de disparo	No. de iteraciones de P y Q	Requisito de reactivos en el rectificador [MVAR]	Requisito de reactivos en el inversor [MVAR]
1	8, 7	48.02	40.67
3	8, 7	48.33	40.67
5	8, 7	48.95	40.67
10	8, 7	51.81	40.67
20	8, 7	62.70	40.68

Tabla 5.9. Número de iteraciones y consumo de reactivos para el caso de una línea ca en paralelo con una línea de cd con el método secuencial, transmitiendo 100 MW por la línea de cd y variando el ángulo de disparo.

5.3 ESTUDIOS DE FLUJOS CA-CD POR EL MÉTODO UNIFICADO

5.3.1 Método unificado P-QCD

Caso 1. Enlace de ca y cd en paralelo

Se toman los datos de la sección C.2 del Apéndice C.

5.3.1.1 Resultados

a) 0 MW a través de la línea de cd

El estudio convergió en 11 iteraciones de P y 10 iteraciones de Q

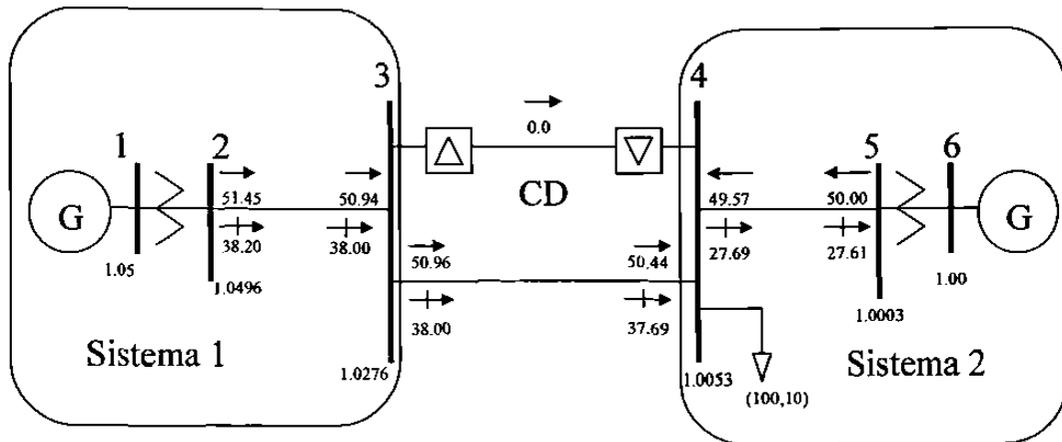


Figura 5.9. Línea de cd transmitiendo 0 MW. Se usa el método P-QCD.

Sistema de cd

Convertidor	Vcd	Icd	Tap	Alfa/gama
1	1.0500	0.0000	0.7662	7.0000
2	-1.0500	0.0000	0.7893	10.0000

Tabla 5.10. Resultados del subsistema de cd con el método P-QCD. Pcd = 0 MW

b) 50 MW a través de la línea de cd

El estudio convergió en 10 iteraciones de P y 10 iteraciones de Q

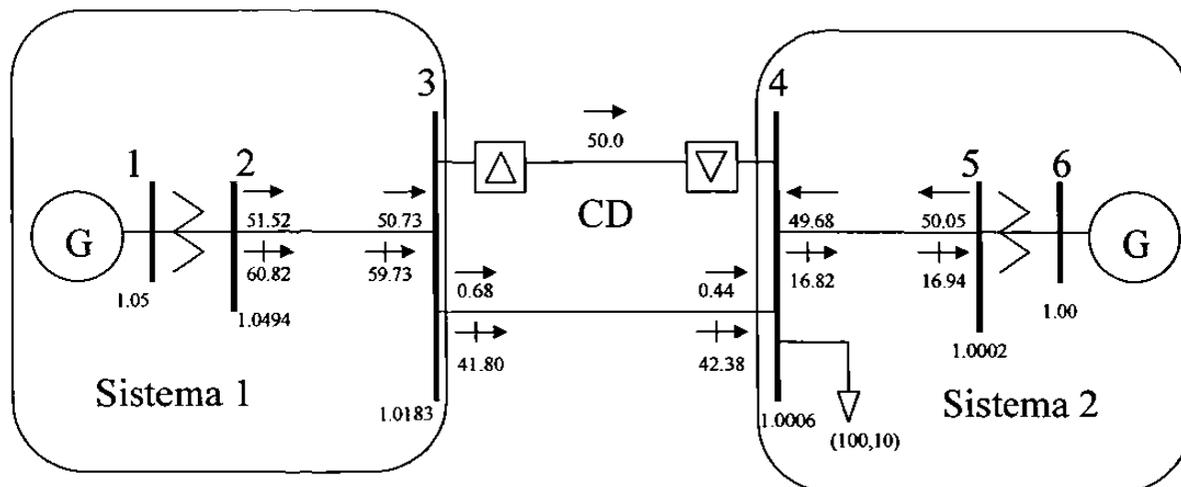


Figura 5.10. Línea de cd transmitiendo 50 MW. Se usa el método P-QCD

5.3.2 Método unificado PCD-QCD

Caso 1. Enlace de ca y cd en paralelo

Se toman los datos de la sección C.2 del Apéndice C.

5.3.2.1 Resultados

a) 0 MW a través de la línea de cd

El estudio convergió en 11 iteraciones de P y 10 iteraciones de Q

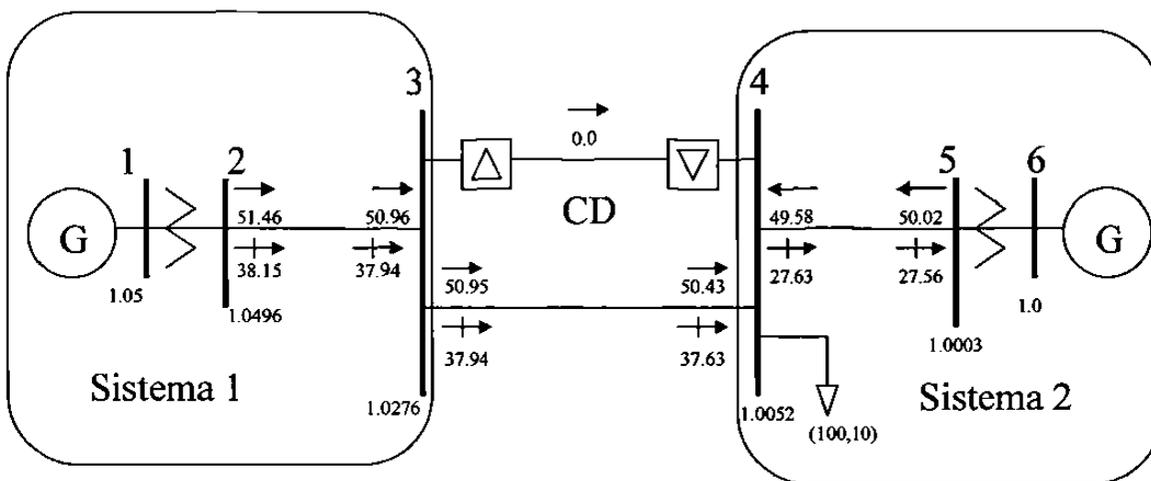


Figura 5.12. Línea de cd transmitiendo 0 MW. Se usa el método PCD-QCD

Sistema de *cd*

Convertidor	V _{cd}	I _{cd}	Tap	Alfa/gama
1	1.0500	-0.0000	0.7662	7.0000
2	-1.0500	-0.0000	0.7893	10.0000

Tabla 5.13. Resultados del subsistema de cd con el método PCD-QCD. P_{cd} = 0 MW

b) 50 MW a través de la línea de cd

El estudio convergió en 9 iteraciones de P y 10 iteraciones de Q

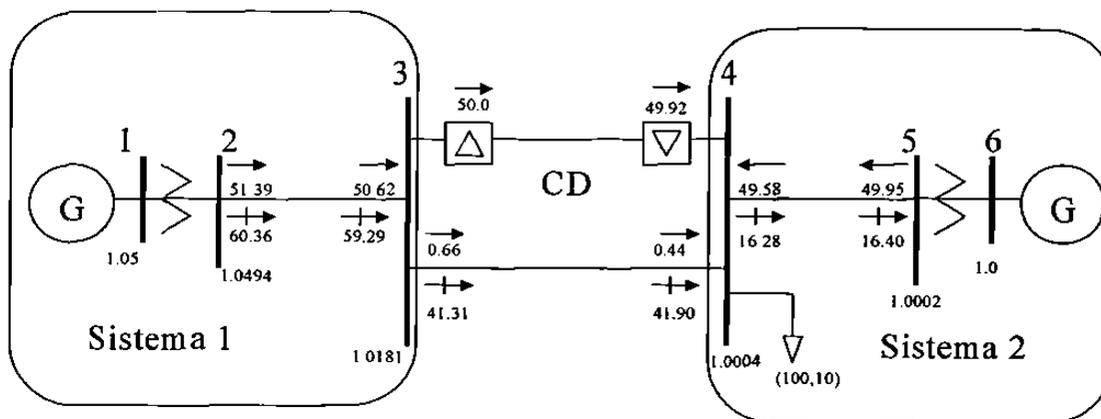


Figura 5.13. Línea de cd transmitiendo 50 MW. Se usa el método PCD-QCD

Sistema de *cd*

Convertidor	V _{cd}	I _{cd}	Tap	Alfa/gama
1	1.0516	0.4755	0.8166	7.0000
2	-1.0500	0.4755	0.8181	10.0000

Tabla 5.14. Resultados del subsistema de cd con el método PCD-QCD. P_{cd} = 50 MW

c) 100 MW a través de la línea de cd

El estudio convergió en 30 iteraciones de P y Q

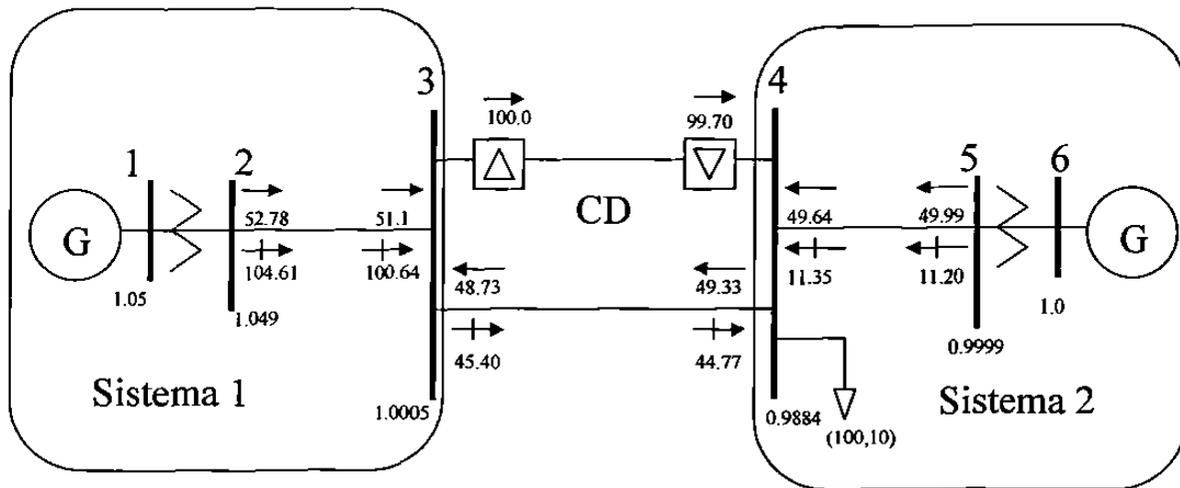


Figura 5.14. Línea de cd transmitiendo 100 MW. Se usa el método PCD-QCD

Sistema de *cd*

Convertidor	Vcd	Icd	Tap	Alfa/gama
1	1.0532	0.9495	0.8660	7.0000
2	-1.0500	0.9495	0.8443	10.0000

Tabla 5.15. Resultados del subsistema de cd con el método PCD-QCD. $P_{cd} = 100$ MW

5.3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

- ✓ Para el caso donde no se transmite potencia por el enlace de *cd*, el algoritmo converge en 11 iteraciones con los dos métodos, con resultados similares de flujos de potencia y voltajes.
- ✓ En el caso con 50 MW a través del enlace de *cd*, la solución se obtiene en 10 iteraciones con resultados similares en voltajes y flujos de potencia con los dos métodos.
- ✓ Al transmitir 50 MW en *cd*, en la estación rectificadora e inversora se requieren 18 MVAR y 15.5 MVAR respectivamente, y se observa un incremento en la transmisión de reactivos.

- ✓ Al transmitir 100 MW por la línea de *cd*, el método P-QCD obtiene la solución en 10 iteraciones, mientras que el método PCD-QCD no alcanza la convergencia en 30 iteraciones, sin embargo por el criterio de convergencia el error es tan pequeño que los resultados obtenidos son bastante buenos.

CASO	No. de iteraciones de P y Q		Consumo de reactivos del Rectificador [MVAR]		Consumo de reactivos del Inversor [MVAR]	
	P-QCD	PCD-QCD	P-QCD	PCD-QCD	P-QCD	PCD-QCD
0 MW	11, 10	11, 10	0.00	0.00	0.00	0.00
50 MW	10, 10	9, 10	17.92	17.92	15.55	15.55
100 MW	10, 10	>30, >30	49.72	47.12	40.47	37.37

Tabla 5.16. Número de iteraciones y consumo de reactivos para el caso de una línea ca en paralelo con una de *cd* con el método unificado.

5.4 ESTUDIOS DE FLUJOS CA-CD INCLUYENDO EL ESQUEMA BTB

Se analizan tres modos de control:

1. BTB en Modo de Control de Potencia

En este modo el BTB transmitirá la potencia activa al nivel seleccionado. La potencia reactiva aportada por la estación convertidora será cero mientras el voltaje esté dentro de la banda especificada.

2. BTB en Modo de Control de Voltaje

En este modo, el BTB opera básicamente en la misma forma que el Modo de Control de Potencia, la diferencia es que la banda de variación del voltaje es cero por lo que el voltaje tiene un valor fijo.

3. BTB como Compensador Estático de VARS, (STATCOM)

La potencia activa a través del BTB es cero y los extremos se comportan como nodos de voltaje controlado.

5.4.1 BTB en paralelo con línea de ca

Se toman los datos de la sección C.3 del apéndice C.

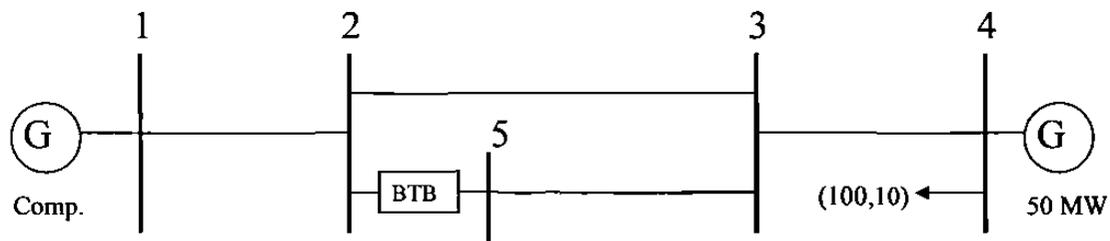


Figura 5.15. Red eléctrica 3 para los casos 1, 2 y 3 BTB en paralelo con LT de ca.

5.4.1.1 Modo de Control de Potencia (MCP)

a) 0.0 MW a través del BTB

El estudio convergió en 3 iteraciones

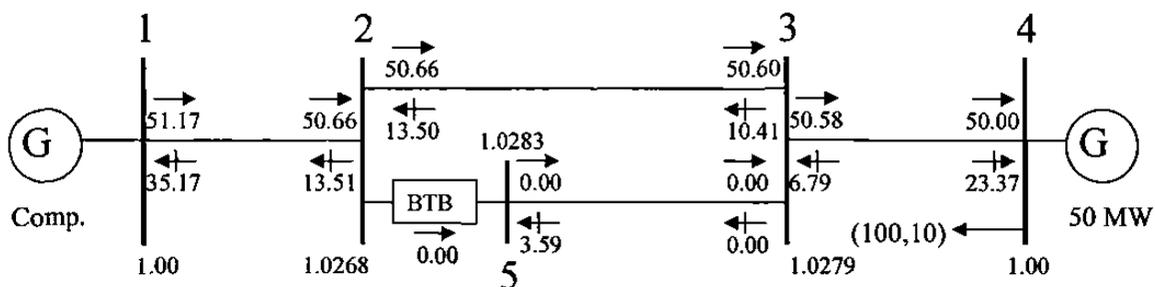


Figura 5.16. BTB en paralelo transmitiendo 0 MW en MCP.

b) 50 MW a través del BTB

El estudio convergió en 3 iteraciones

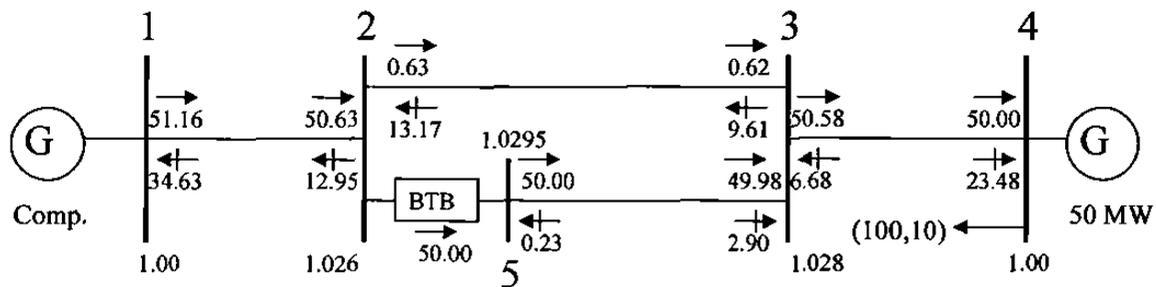


Figura 5.17. BTB en paralelo transmitiendo 50 MW en MCP.

c) 100 MW a través del BTB

El estudio convergió en 4 iteraciones

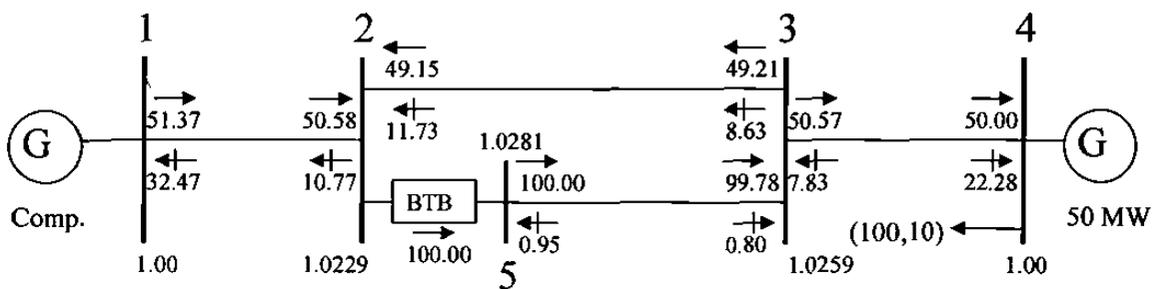


Figura 5.18. BTB en paralelo transmitiendo 100 MW en MCP.

5.4.1.2 Modo de Control de Voltaje (MCV)

a) 50 MW a través del BTB y 1.0 pu en sus extremos

El estudio convergió en 6 iteraciones

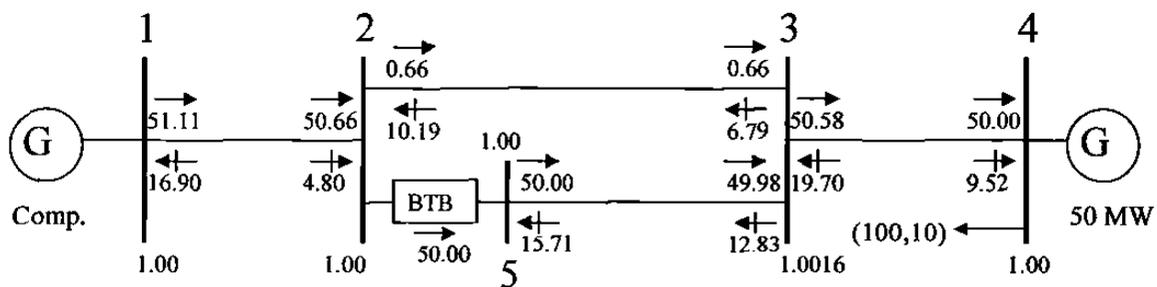


Figura 5.19. BTB en paralelo transmitiendo 50 MW en MCV.

b) 100 MW a través del BTB y 1.0 pu en sus extremos

El estudio convergió en 6 iteraciones

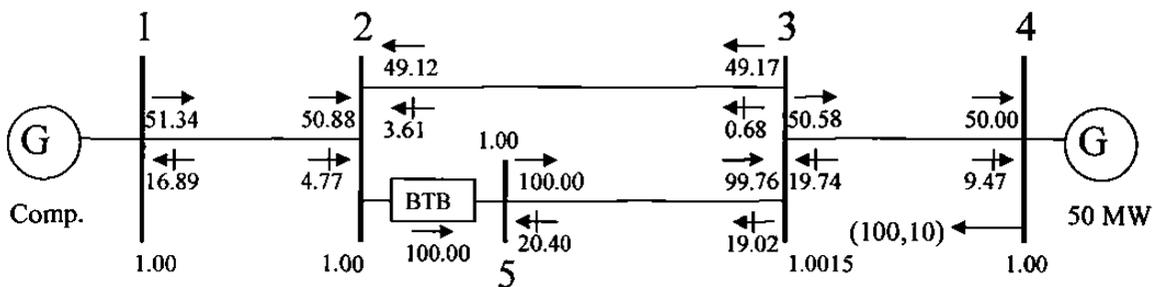


Figura 5.20. BTB en paralelo transmitiendo 100 MW en MCV.

5.4.1.3 BTB como STATCOM (MCS)

a) 1.0 pu en cada extremo del BTB

El estudio convergió en 6 iteraciones

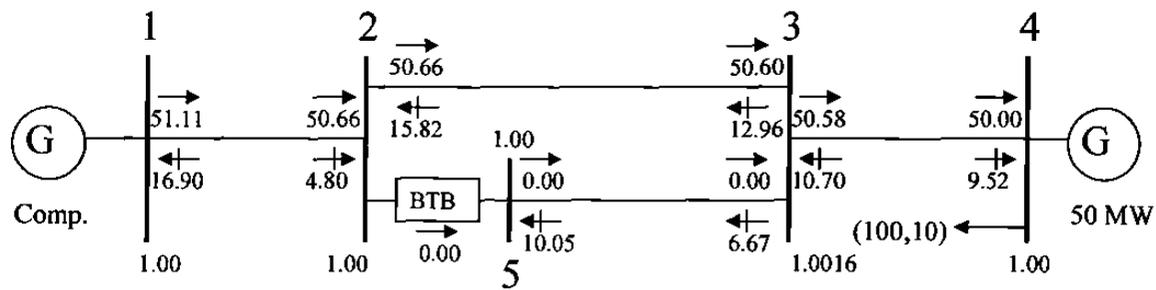


Figura 5.21. BTB en paralelo en MCS a)

b) 0.95 pu y 1.05 pu en los extremos del BTB respectivamente

El estudio convergió en 9 iteraciones

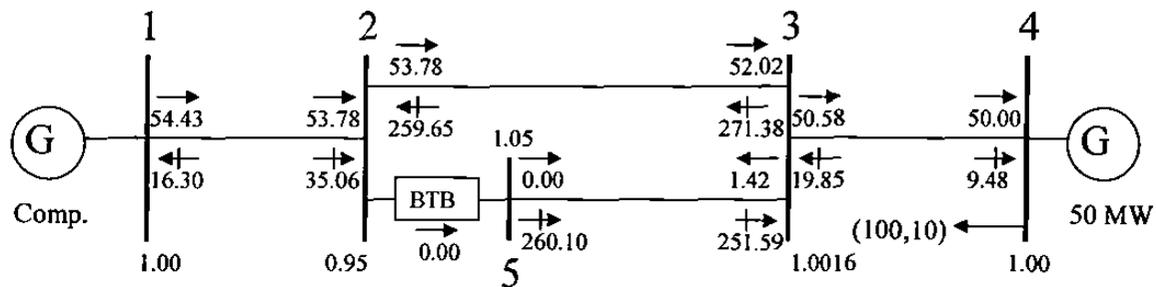


Figura 5.22. BTB en paralelo en MCS b)

5.4.2. Enlace asíncrono por medio de un BTB

Se toman los datos de la sección C.4 del apéndice C.

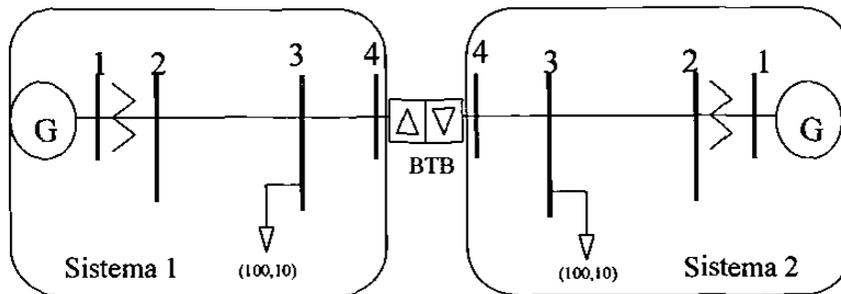


Figura 5.23. Red eléctrica para 4 los casos 4, 5 y 6. Enlace asíncrono por medio de un BTB.

5.4.2.1 Modo de Control de Potencia

a) 0 MW a través del BTB

El sistema 1 convergió en 4 iteraciones

El sistema 2 convergió en 4 iteraciones

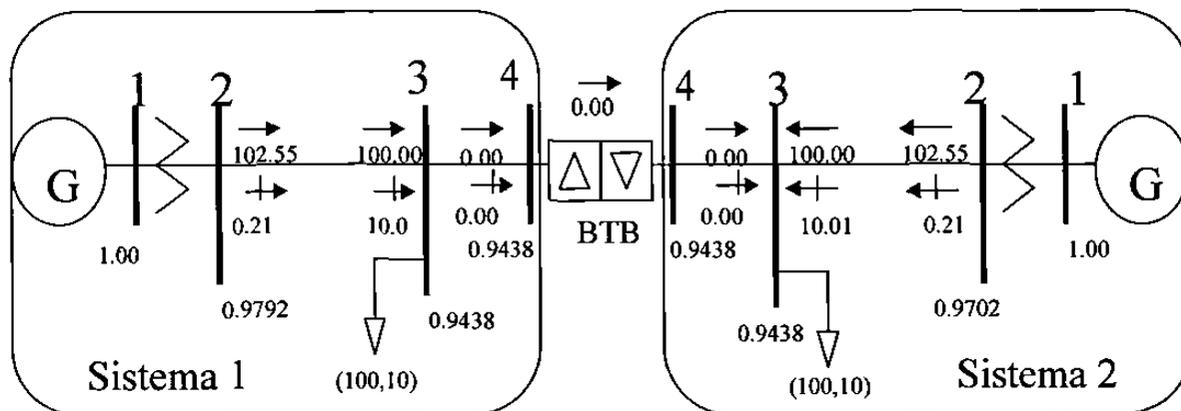


Figura 5.24. BTB transmitiendo 0 MW en MCP.

b) 50 MW a través del BTB

El sistema 1 convergió en 3 iteraciones

El sistema 2 convergió en 5 iteraciones

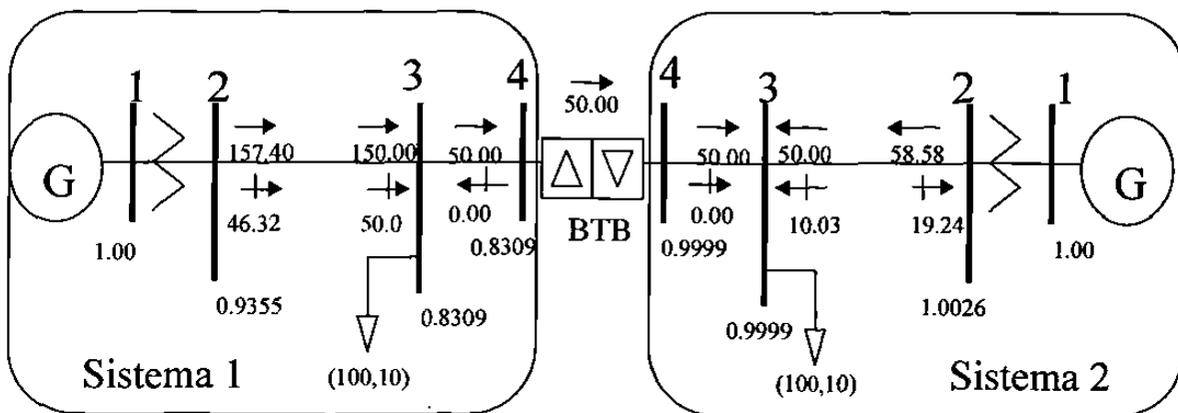


Figura 5.25. BTB transmitiendo 50 MW en MCP.

c) 100 MW a través del BTB

El sistema 1 no alcanzó tolerancia en 20 iteraciones

El sistema 2 convergió en 3 iteraciones

No se incluye diagrama de este caso dado que el sistema 1 no alcanzó tolerancia y los valores desplegados no arrojan la solución.

5.4.2.2 Modo de Control de Voltaje

a) 50 MW a través del BTB y 1.0 pu en sus extremos

El sistema 1 convergió en 7 iteraciones

El sistema 2 convergió en 4 iteraciones

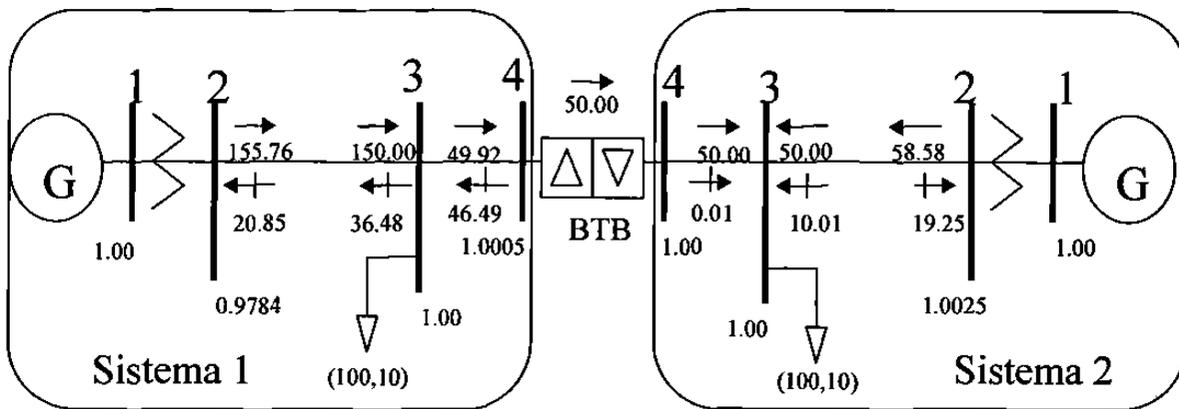


Figura 5.26. BTB transmitiendo 50 MW en MCV.

b) 100 MW a través del BTB y 1.0 pu en los extremos

El sistema 1 convergió en 15 iteraciones

El sistema 2 convergió en 3 iteraciones

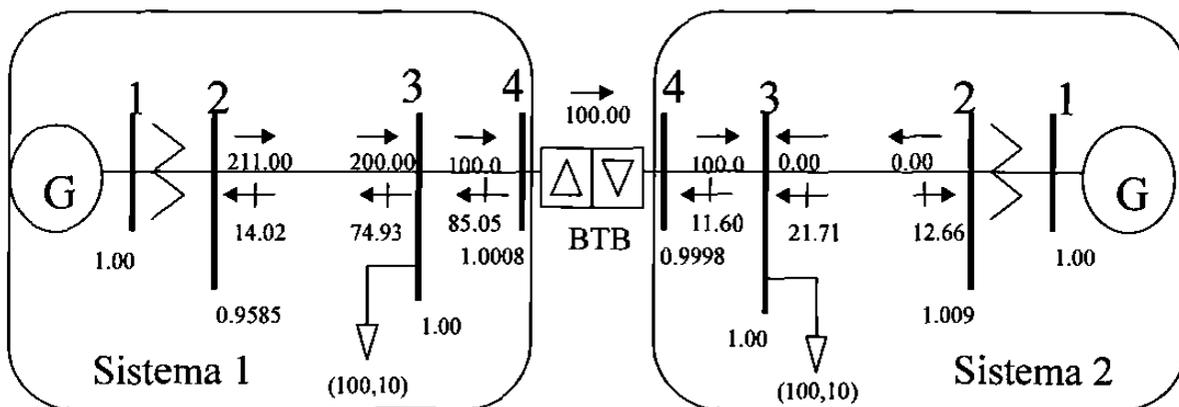


Figura 5.27. BTB transmitiendo 100 MW en MCV.

5.4.2.3 BTB como STATCOM

a) 1.0 pu en los extremos del BTB

El sistema 1 convergió en 6 iteraciones

El sistema 2 convergió en 6 iteraciones

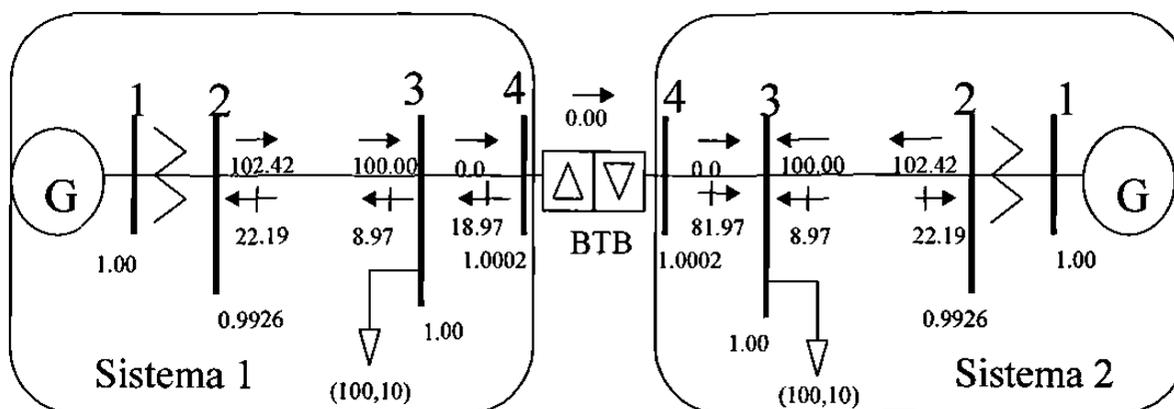


Figura 5.28. BTB en MCS a).

b) 0.95 y 1.05 pu y en los extremos del BTB

El sistema 1 convergió en 7 iteraciones

El sistema 2 convergió en 8 iteraciones

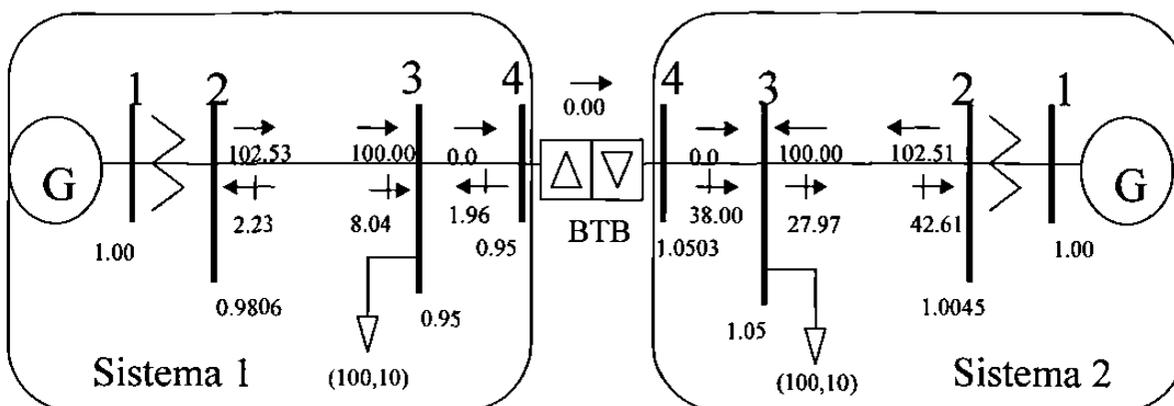


Figura 5.29. BTB en MCS b).

5.4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Para el modo de control de potencia, no hay requerimiento de reactivos por parte del BTB, mientras que al controlar el voltaje se requiere potencia reactiva por parte del BTB.
- Para el caso BTB en paralelo con línea de ca , al no transmitir potencia a través del BTB en modo de control de potencia, se obtiene la solución a las 3 iteraciones, y en 6 en modo de STATCOM.
- Al transmitir 50 MW a través del BTB, la solución se tiene a las 6 iteraciones en modo de control de voltaje, y en 3 iteraciones en modo de control de potencia.
- Al transmitir 100 MW a través del BTB, se alcanza la solución en 6 iteraciones en modo de control de voltaje y en 4 en modo de control de potencia.
- Para el caso con el BTB como enlace asíncrono, al no transmitir potencia a través del BTB se alcanza la solución en 6 iteraciones en el modo de STATCOM, y 4 iteraciones en modo de control de potencia.
- Al transmitir 50 MW por el BTB la solución se obtiene en 7 iteraciones en el área 1 y 4 iteraciones en el área 2 en el modo de voltaje y en 3 y 5 respectivamente en modo de control de potencia. En modo de control de potencia se presenta una caída de voltaje de hasta 0.83 pu en el nodo rectificador del BTB, por lo cual en este caso se cambia antes a modo de control de voltaje.
- Cuando se transmiten 100 MW por el BTB en el caso con enlace asíncrono, la solución se obtiene en 15 iteraciones en el sistema 1 y en 3 iteraciones en el sistema 2 en el modo de voltaje, mientras que en el modo de control de potencia no se alcanza la convergencia.

CONTROL DE VOLTAJE				CONTROL DE POTENCIA		
CASOS	No. de iteraciones	Reactivos en el Rectificador del BTB [MVAR]	Reactivos en el Inversor del BTB [MVAR]	No. de iteraciones	Reactivos en el Rectificador del BTB [MVAR]	Reactivos en el Inversor del BTB [MVAR]
0 MW (STATCOM)	6	-20.57	-10.10	3	0.00	0.00
50 MW	6	-14.71	-15.44	3	0.00	0.00
100 MW	6	-7.38	-19.36	4	0.00	0.00

Tabla 5.17. Número de iteraciones y consumo de reactivos en el BTB en paralelo con una línea de ca en modo de control de voltaje y potencia.

CONTROL DE VOLTAJE					CONTROL DE POTENCIA			
CASOS	No. de iteraciones		Reactivos en el BTB [MVAR]		No. de iteraciones		Reactivos en el BTB [MVAR]	
	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 1	Sistema 2
0 MW (STATCOM)	6	6	18.97	18.97	4	4	0.00	0.00
50 MW	7	4	46.49	0.015	3	5	0.00	0.00
100 MW	15	3	85.05	-11.60	>> 20	3	0.00	0.00

Tabla 5.18. Número de iteraciones y consumo de reactivos en el BTB como enlace asíncrono entre 2 áreas en modo de control de voltaje y potencia.

5.5 RESUMEN

En este capítulo se presentaron los resultados obtenidos sobre las diferentes redes de pruebas. Se analizaron dos modelos de transmisión de *cd*, en el primero se planteó el modelo de línea de *cd* y estación convertidora, el otro modelo analizado fue el modelo del Back to Back. Ambos modelos fueron incorporados en el estudio de flujos de potencia, y se simularon dos casos, uno es el enlace de *cd* en paralelo con una línea de *ca*, el otro caso es la unión de dos sistemas por medio del enlace de *cd* (enlace asíncrono).

Se utilizaron dos tipos de algoritmos para el modelo de la estación HVDC, el secuencial y el unificado. Los resultados obtenidos por cada uno de estos métodos son prácticamente los mismos.

El método secuencial requiere de un número menor de iteraciones que el método unificado para llegar a la solución. Por lo tanto resulta más práctico la utilización de los algoritmos secuenciales ya que además su lógica es más sencilla.

En los distintos casos presentados podemos ver como se incrementa el consumo de reactivos conforme se incrementa el flujo de potencia activa a través del enlace de *cd*, sea este una línea de *cd* o un dispositivo BTB, esto debido a que para mantener los voltajes especificados en las terminales de las estaciones convertidoras se requieren mayores cantidades de reactivos al aumentar el flujo en el enlace.

Observamos también que al mover los ángulos de disparo y de extinción de la estación convertidora (convertidor e inversor respectivamente), tenemos una variación en el consumo de reactivos de la estación convertidora, presentándose el mínimo consumo de reactivos al tener los mínimos ángulos de disparo y extinción.

Se observa también que no es posible transmitir cualquier cantidad de potencia a través del BTB sin tener un fuerte soporte de reactivos (como una fuente local de reactivos), esto se ve claramente en el modo de control de potencia, en el que mientras más potencia se transmite por el BTB, se tiene una mayor caída de voltaje, y el BTB necesita cambiar a modo de control de voltaje para poder transmitir los 100 MW.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones generales sobre el estudio de flujos de potencia en sistemas ca-cd, así como sobre los modelos utilizados en la simulación. Se enumeran las aportaciones que se consideraron más relevantes y se concluye con las recomendaciones sobre posibles trabajos futuros.

6.1.1 Problema de flujos de potencia ca-cd

- El método desacoplado rápido demostró ser un algoritmo práctico y eficaz para la solución de flujos de potencia ca-cd incorporando los modelos de estaciones convertidoras HVDC.
- El método de Newton-Raphson fue utilizado para incorporar un esquema BTB en un estudio de flujos de potencia ca-cd. El algoritmo para incluir el modelo del esquema BTB propone una modificación al jacobiano convencional para cada modo de control.
- Para la solución de flujos ca-cd, el sistema de *cd* se modela como una inyección de P y Q en los nodos convertidores. A su vez el sistema de *ca*, visto desde el sistema de *cd*, se modela con voltajes fijos en los nodos de las estaciones convertidoras.

6.1.2 Modelo del sistema de cd

- El modelo del sistema de *cd* empleado utiliza cinco variables por cada estación convertidora. Esto es, cinco para el proceso de rectificación y cinco para la inversión.

- Las ecuaciones utilizadas para la estación rectificadora son las mismas que para el proceso de inversión, sólo se debe cambiar el ángulo de disparo por el ángulo de extinción. Además, el voltaje de cd es de polaridad contraria en las estaciones.

6.1.3 Formulación desarrollada

- En la solución con el algoritmo unificado, los elementos de la matriz B'' son constantes excepto aquellos relacionados con elementos que conectan a la estación convertidora. Para esos casos, en cada iteración se deben recalcular dichos elementos debido a su dependencia con las variables del sistema de cd .
- El método desacoplado rápido secuencial no requiere modificar el algoritmo de solución del sistema de ca , ya que resuelve separadamente los sistemas de ca y de cd .
- Los algoritmos desarrollados pueden incluir como variables de control la potencia en la línea de cd , el voltaje de cd en la estación inversora y los ángulos de disparo y extinción, se comprobó que los algoritmos responden bien para cualquier modo de control.

6.1.4 Modelado del esquema BTB

- La incorporación del esquema BTB requiere modificar el jacobiano del conjunto de ecuaciones, ya que los nodos conectados a éste dejan de ser nodos convencionales (carga o generación) para convertirse en “nodos BTB” con tres ecuaciones y una incógnita y viceversa.
- Se comprobó mediante simulaciones, la versatilidad de los algoritmos desarrollados considerando tres modos de control diferentes (modo de control de potencia, modo de control de voltaje y modo de STATCOM), con resultados satisfactorios.

6.1.5 Resultados de las simulaciones

- Se observó que entre más potencia activa se transmita por el enlace de *cd*, el requerimiento de potencia reactiva de las estaciones convertidoras es mayor.
- Los diferentes métodos de solución para el problema de flujos logran que el sistema de *cd* sea resuelto en dos o tres iteraciones.
- Cuando se tiene un enlace de *cd* en paralelo con el de *ca*, al controlar el flujo en el enlace de *cd* se controla automáticamente el flujo (magnitud y dirección) en la línea de *ca*.
- Al variar el ángulo de disparo desde un valor pequeño a uno grande, manteniendo fijo el flujo en el enlace de *cd*, se observa que el consumo de reactivos en la estación rectificadora aumenta, mientras que en la estación inversora se mantiene prácticamente sin cambio.
- Para problemas similares, el método unificado (en sus dos versiones) requiere más iteraciones que el secuencial para llegar a la solución.
- Las dos versiones del método unificado (P-QCD y PCD-QCD) obtienen prácticamente los mismos resultados en el mismo número de iteraciones.
- Al resolver un problema con un esquema BTB, el área que envía potencia requiere más iteraciones que el área importadora para encontrar la solución.
- El modelo del esquema BTB propuesto permite simular su utilización como enlace asíncrono o como compensador estático (STATCOM).

6.2 APORTACIONES DE LA TESIS

La utilización y el desarrollo de dispositivos que convierten y transmiten energía en *cd* hace necesario el desarrollo de modelos que representen estos elementos para que a su vez sean incorporados a los algoritmos de flujos de potencia convencionales. En el presente trabajo se reportan modelos que son usados para el análisis en estado estable.

Las aportaciones de este trabajo de tesis son:

- El planteamiento del problema de flujos de potencia en sistemas *ca-cd* considerando las variables del sistema de *cd*.
- El desarrollo, implantación y prueba de tres algoritmos para estudios de flujos *ca-cd*, con estaciones convertidoras HVDC, denominados: “secuencial”, “unificado PCD-QCD” y “unificado P-QCD”.
- El desarrollo del modelo de un esquema BTB y el algoritmo para incluirlo en un estudio de flujos de potencia usando el método Newton-Raphson.
- Definición de un procedimiento para incluir diferentes modos de control en el modelo del esquema BTB.

6.3 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

- Se propone el estudio de sistemas HVDC con estaciones convertidoras en varios nodos del sistema.
- Continuar con el desarrollo de otros modelos de estaciones convertidoras que permitan simular las nuevas tecnologías emergentes para el control de flujos de potencia *ca-cd*.

- Modelar las variables del sistema de *cd* en un esquema BTB.

- Desarrollo de un algoritmo para modelar esquemas BTB basado en el método desacoplado rápido.

- Modelar el comportamiento de sistemas eléctricos con fuentes de energía renovables:
 - Aerogeneradores
 - Energía solar

APÉNDICE A

MODELADO DE UNA PLANTA CONVERTIDORA CA-CD

A.1 INTRODUCCIÓN

Aunque un dispositivo de electrónica de potencia es básicamente un conmutador, la periodicidad de las secuencias de conmutación pueden ser usadas en estudios de estado estable para modelar las condiciones de carga de potencia activa y reactiva de los convertidores de ca-cd en los nodos involucrados. Tal modelado es discutido aquí con referencia a la configuración más común usada en los sistemas eléctricos, esto es, el puente rectificador trifásico mostrado en la figura A.1.

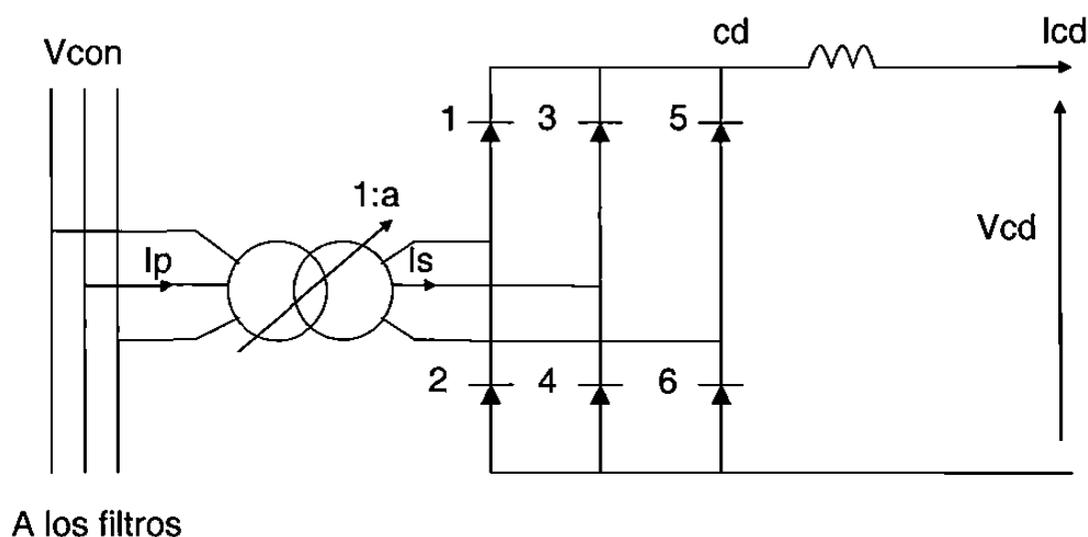


Figura A.1. Puente rectificador trifásico básico

Se hacen las siguientes consideraciones en el desarrollo del modelo en estado estable:

- (i) La caída de voltaje en un tiristor es despreciada. Esto es justificado por el hecho de que la caída de voltaje es muy pequeña en comparación con el voltaje normal de operación.
- (ii) La reactancia de dispersión del transformador convertidor vista de las terminales del secundario es idéntica para las tres fases, y la variación en la reactancia de dispersión causada por el cambiador de tap bajo carga no se consideran.
- (iii) El rizo en la corriente directa es ignorado, o sea que, se asume que hay suficiente inductancia de alizamiento en el lado de cd .

A.2 RECTIFICACIÓN^{[4][8][9]}

La estación rectificadora puede usar diodos o tiristores en configuraciones de medio puente o puente completo. En algunos casos los puentes de diodos son complementados por transformadores con cambiador de tap bajo carga y con control del reactor saturable.

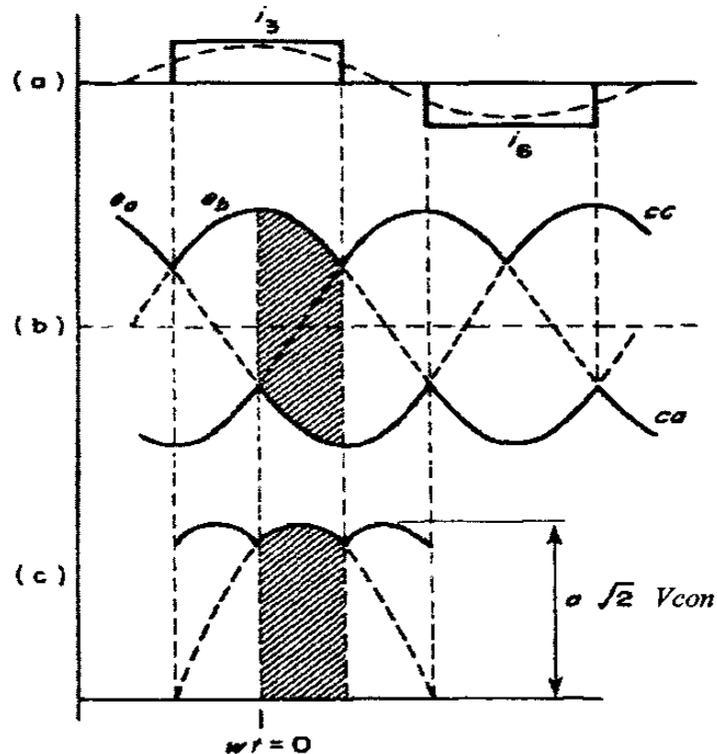


Figura A.2. Formas de onda del diodo rectificador. (a) corriente alterna en la fase "b"; (b) Forma de onda del voltaje ánodo común (ac) y cátodo común (cc); (c) Voltaje rectificado

En referencia a la figura A.2 y usando como tiempo de referencia el instante cuando el voltaje de fase a neutro de la fase "b" es máximo, el voltaje de conmutación del tiristor 3 puede ser expresado como:

$$e_b - e_a = \sqrt{2} a V_{con} \operatorname{sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{3} \right)$$

Donde "a" es el valor de la posición del tap del transformador del convertidor. El área sombreada en la figura A.2(b) indica la diferencia de potencial entre los polos de los puentes

del cátodo común (cc) y el ánodo común (ac) para el caso de rectificación no controlada. El máximo voltaje promedio rectificado se determina como:

$$V_0 = \frac{1}{\pi/3} \int_0^{\pi/3} \sqrt{2}aV_{con} \text{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} aV_{con} \quad (\text{A.1})$$

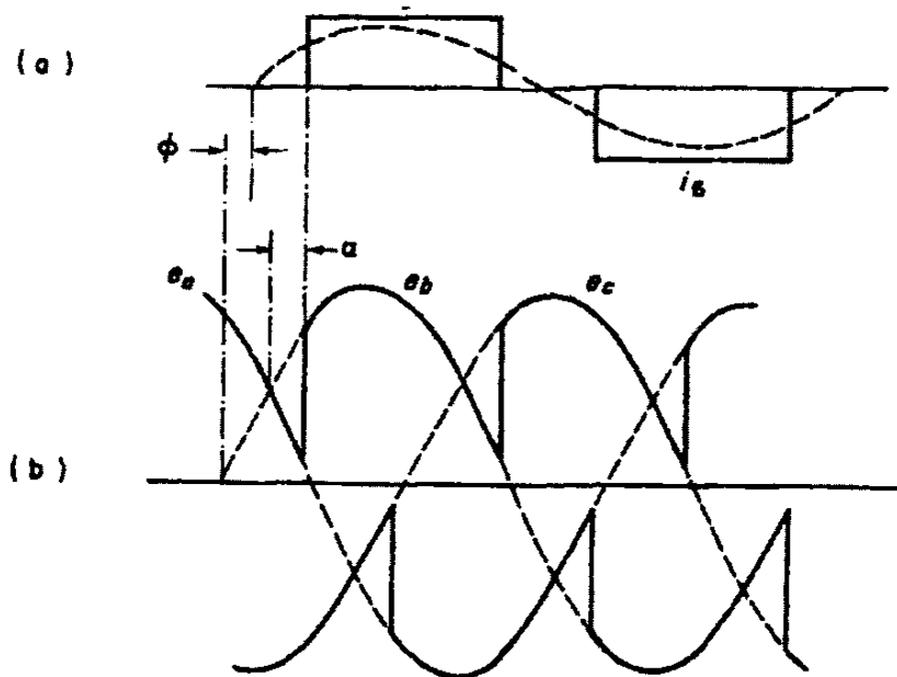


Figura A.3. Formas de onda del puente rectificador controlado. (a) Corriente alterna en la fase "b"; (b) Formas de onda del voltaje de cd rectificado

Con control de retraso de ángulo el voltaje promedio rectificado (mostrado en la figura A.3) se determina mediante:

$$V_d = \frac{1}{\pi/3} \int_{\alpha}^{\pi/3+\alpha} \sqrt{2}aV_{con} \text{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) d(\omega t) = V_0 \cos \alpha \quad (\text{A.2})$$

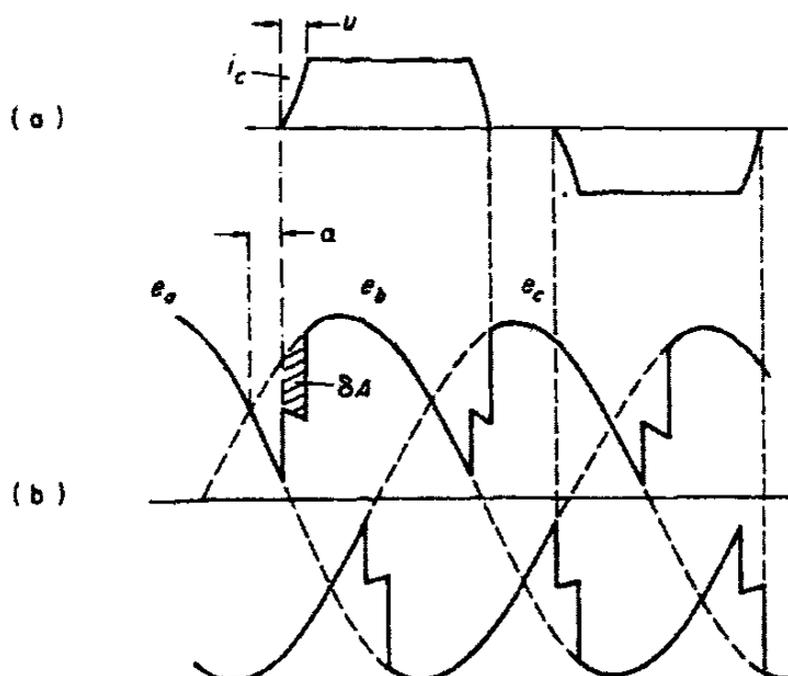


Figura A.4. Efecto de la reactancia de conmutación. (a) Corriente alternando; (b) Formas de onda del voltaje de cd

En la práctica las formas de onda de voltaje son aquellas de la figura A.4, donde un área de voltaje (δA) es la pérdida debido a la reactancia (X_c) del sistema de ca (vista desde el convertidor), referida a la reactancia de conmutación. La energía almacenada en esta reactancia tiene que ser transferida de la fase de salida a la fase de entrada, y este proceso resulta en un ángulo de traslape de conmutación o de conducción (u). Con referencia a la figura A.4, e ignorando el efecto de la resistencia en el circuito de conmutación, el área δA puede ser determinada a partir de:

$$e_b - e_a = 2 \frac{X_c}{\omega} \frac{di_c}{dt} \quad (\text{A.3})$$

donde e_a , e_b son los voltajes instantáneos de las fases a y b respectivamente, e i_c es la corriente entrante (de conmutación) en la válvula.

$$\delta A = \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \frac{e_b - e_a}{2} d(\omega t) = X_c \int_0^{I_c} di_c = X_c I_{cd} \quad (\text{A.4})$$

Finalmente, combinando las ecuaciones (A.1), (A.2) y (A.4) se obtiene la siguiente relación de voltaje ca-cd

$$V_d = V_0 \cos \alpha - \frac{\delta A}{\pi/3} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a V_{con} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_c I_{cd} \quad (\text{A.5})$$

Se debe enfatizar que el voltaje de conmutación (V_{con}) es el voltaje de ca en el punto más cercano al puente convertidor. La reactancia de conmutación (X_c) es la reactancia entre el punto donde se mide V_{con} y el puente. Si hay filtros instalados, el voltaje en el filtro puede ser usado como V_{con} . En ausencia de filtros, V_{con} debe ser establecido en algún punto remoto y X_c debe ser modificado para incluir la impedancia del sistema del punto remoto al convertidor.

Con un filtrado perfecto, sólo la componente fundamental de la forma de onda de la corriente aparecerá en el sistema de ca . Esta componente se obtiene del análisis de Fourier de la forma de onda de la corriente en la figura A.4.

Tomando como referencia el instante cuando el voltaje de línea ($e_b - e_a$) es cero, la ecuación (A.3) puede ser escrita como:

$$\sqrt{2} a V_{con} \sin \omega t = 2 \frac{X_c}{\omega} \frac{di_c}{dt}$$

integrando al ecuación se obtiene:

$$-\frac{1}{\sqrt{2}} a V_{con} \cos \omega t + K = X_c i_c$$

De la condición inicial; con $i_c = 0$ y $\omega t = \alpha$ se obtienen las siguientes expresiones para K e i_c .

$$K = \frac{1}{\sqrt{2}} a V_{con} \cos \alpha$$

$$i_c = \frac{a V_{con}}{\sqrt{2} X_c} [\cos \alpha - \cos \omega t] \quad (\text{A.6})$$

De la condición final; con $i_c = i_d$ y $\omega t = \alpha + u$ se obtienen las siguientes expresiones:

$$I_{cd} = \frac{a V_{con}}{\sqrt{2} X_c} [\cos \alpha - \cos(\alpha + u)] \quad (\text{A.7})$$

$$u = \cos^{-1} \left[\cos \alpha - \frac{\sqrt{2} X_c I_{cd}}{a V_{con}} \right] - \alpha \quad (\text{A.8})$$

La ecuación (A.6) es la corriente de conmutación en el tiempo y la ecuación (A.8) define los límites para el análisis de Fourier.

El análisis de Fourier de la forma de onda de la corriente de ca , incluyendo el efecto de conmutación (figura A.4) lleva a la siguiente relación entre el valor rms de la componente fundamental y la corriente directa:

$$I_s = k \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{cd} \quad (\text{A.9})$$

donde

$$k = \frac{\sqrt{[\cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + u)]^2 + [2u + \text{sen} 2\alpha - \text{sen} 2(\alpha + u)]^2}}{4[\cos \alpha - \cos(\alpha + u)]}$$

para valores de u que no excedan 60° .

Los valores de k son muy cercanos a la unidad bajo condiciones normales de operación, esto es, cuando el voltaje y la corriente son muy cercanos a sus valores nominales y las formas de voltaje de ca son simétricas y no distorsionadas.

Tomando en cuenta la posición del tap del transformador, la corriente en el lado primario es

$$I_p = k \frac{\sqrt{6}}{\pi} a I_{cd} \quad (\text{A.10})$$

Cuando se usan valores por unidad basados en una potencia y voltaje base común en ambos lados del convertidor, la corriente directa base tiene que ser $\sqrt{3}$ veces más grande que la corriente base de ca , y se obtiene la ecuación:

$$I_p = k \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a I_{cd} \quad (\text{A.11})$$

Usando las componentes fundamentales de voltaje y corriente, suponiendo un filtrado perfecto en las terminales del convertidor, un ángulo del factor de potencia en las terminales del convertidor ϕ se puede expresar la potencia activa.

$$P = \sqrt{3} V_{con} I_p \cos \phi = V_{cd} I_{cd} \quad (\text{A.12})$$

la relación entre ángulos

$$\cos \phi = \frac{1}{2k} (\cos \alpha + \cos \delta) \quad (\text{A.13})$$

y la potencia reactiva

$$Q = \sqrt{3} V_{con} I_p \text{sen} \phi \quad (\text{A.14})$$

A.3 INVERSIÓN^{[4][8][9]}

Debido a la naturaleza unidireccional del flujo de la corriente en los tiristores, (el flujo de potencia del lado de cd al lado de ca), se requiere de un voltaje en cd de polaridad inversa. Esto se lleva a cabo con el control de retraso de ángulo α , que en ausencia del traslape de conmutación produce una rectificación entre $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ y una inversión entre $90^\circ < \alpha < 180^\circ$. En presencia del traslape, el valor de " α " al cual la inversión comienza es menos de 90° . Más aun, a diferencia de la rectificación, la inversión completa no puede ser llevada a la práctica. Esto es debido a la necesidad de cierto ángulo de extinción γ al final del periodo de conducción, antes de que el voltaje a través de las válvulas de conmutación se invierta, esto es

$$\alpha + u \leq \gamma_0$$

El voltaje del inversor, aunque de polaridad opuesta con respecto al rectificador, está usualmente expresado como positivo cuando se considera por separado.

Podemos definir el ángulo de extinción γ como:

$$\gamma = 180 - \alpha - u$$

$$\gamma \geq \omega t_q$$

donde t_q es el tiempo mínimo de polarización inversa para el apagado del tiristor.

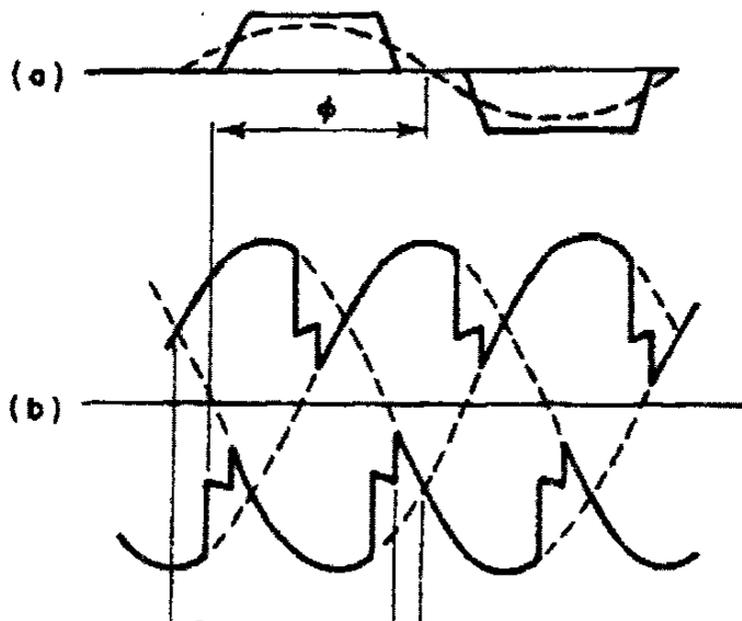


Figura A.5. Formas de onda del inversor. (a) Corriente alternando; (b) Formas de onda del voltaje de *cd*

Las formas de onda típicas del voltaje y la corriente del inversor se ilustran en la figura A.5. Por la similitud con las formas de onda de la figura A.4, las expresiones para el voltaje del inversor se escriben en términos del ángulo de extinción:

$$V_{cd} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} aV_{con} \cos \gamma - \frac{3X_c}{\pi} I_{cd} \quad (\text{A.15})$$

que es similar a la ecuación (A.5) sustituyendo α por γ .

Para la operación del inversor requiere la existencia de las siguientes tres condiciones:

- (i) Un sistema activo de *ca* que provee el voltaje de conmutación.
- (ii) Un voltaje de *cd* con polaridad opuesta para continuidad del flujo de la corriente unidireccional.
- (iii) Un proceso de rectificación controlada para dar retrasos de disparo más allá de 90° .

Cuando estas tres condiciones se cumplen, un voltaje negativo con una magnitud dada por la ecuación (A.15), está presente a través del puente convertidor y la potencia ($-V_{cd}I_{cd}$) está con una dirección inversa. Se debe notar que el ángulo del factor de potencia (ϕ) es ahora más grande que 90° .

$$P = \sqrt{3}V_{con}I_p \cos \phi = -\sqrt{3}V_{term}I_p \cos(\pi - \phi) \quad (A.16)$$

$$Q = \sqrt{3}V_{con}I_p \text{sen} \phi = \sqrt{3}V_{con}I_p \text{sen}(\pi - \phi) \quad (A.17)$$

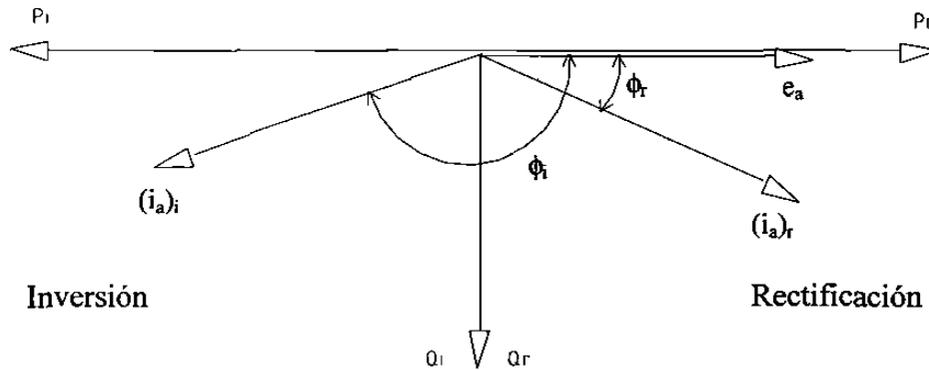


Figura A.6. Diagrama vectorial de P y Q

Las ecuaciones (A.16) y (A.17) indican que el proceso de inversión requiere una fuente de potencia reactiva del lado de ca .

El diagrama vectorial de la figura A.6 ilustra los signos de P y Q para la rectificación y la inversión, podemos notar que tanto para la rectificación como para la inversión Q no cambia de signo lo que significa que el puente siempre está consumiendo potencia reactiva.

A.4 TRANSMISIÓN EN CD^{[8][9]}

Los extremos de envío y recepción de un enlace de transmisión en cd con dos terminales puede ser modelado como un puente equivalente con voltaje terminal V_{dr} y V_{di} respectivamente. La corriente directa se calcula mediante:

$$I_{cd} = I_{dr} = I_{di} = \frac{V_{dr} - V_{di}}{R_d} \quad (A.21)$$

donde R_d es la resistencia del enlace e incluye la resistencia de los reactores de alizamiento y los tiristores.

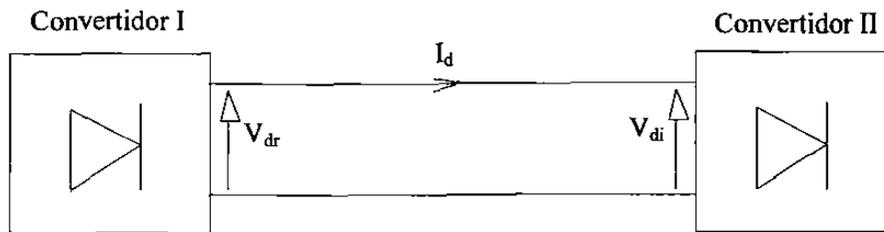


Fig A.7. Enlace de *cd* de dos terminales.

Las principales consideraciones en la operación del sistema de transmisión de *cd* son minimizar la necesidad de potencia reactiva en las terminales y reducir las pérdidas del sistema. Estos objetivos requieren de mantener el voltaje de transmisión más alto posible. Esto se logra minimizando los ángulos de disparo y de extinción.

APÉNDICE B

LA ESTACIÓN CONVERTIDORA HVDC COMPACTA

B.1 Características generales^[1]

La estación compacta es una alternativa para la transmisión convencional o generación local en muchas situaciones. Las posibles aplicaciones incluyen:

- Suministro de cargas aisladas
- Conexión de redes asíncronas
- Alimentación de generación a pequeña escala
- Alimentación a centros urbanos
- Redes de CD

El tamaño de las unidades compactas varía de unas pocas decenas de MW hasta 300 MW. En aplicaciones con voltajes de CD arriba de ± 150 kV las unidades pueden ser conectadas en paralelo.

La estación compacta consiste de dos elementos: la estación convertidora y un par de cables. Las estaciones convertidoras son Convertidoras de Fuentes de Voltaje (CFV) que emplean semiconductores de tecnología avanzada.

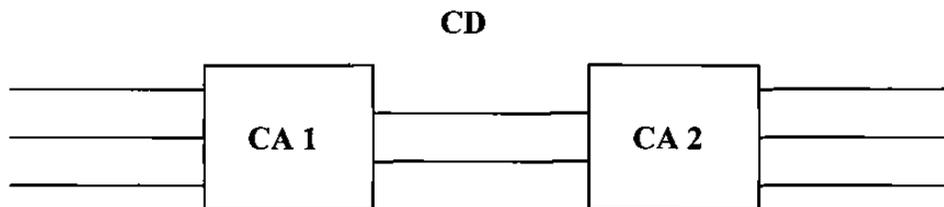


Figura B.1. Esquema simbólico de la estación convertidora HVDC.

A diferencia de la HVDC convencional, la HVDC compacta no depende de la habilidad de la red de CA para mantener el voltaje y la frecuencia estables. Esto da una flexibilidad adicional con respecto a la localización de los convertidores en el sistema de CA.

El diseño de la HVDC compacta está basado en un concepto modular de medidas estandarizadas. La mayoría del equipo es encapsulado, lo cual hace la instalación de campo rápida y eficiente. Las estaciones son compactas y necesitan poco espacio.

Las estaciones son diseñadas para operar sin personal y virtualmente libres de mantenimiento. La operación puede ser llevada a cabo remotamente o puede ser automática, basada en las necesidades de las redes interconectadas de CA. No se requieren enlaces de comunicación entre las estaciones convertidoras. Los requerimientos de mantenimiento son determinados por las pocas piezas del equipo convencional tales como los interruptores de CA y las bombas y los abanicos en el sistema de enfriamiento.

Dado que la potencia es transmitida por medio de un par de cables subterráneos no hay impacto visual, no hay corriente a tierra y los campos electromagnéticos de los cables se cancelan uno al otro. Los cables de la HVDC compacta son confiables. Los materiales seleccionados dan a los cables alta resistencia mecánica, alta flexibilidad y poco peso. Los cables son pequeños, aunque robustos y pueden ser instalados como un “*plug in*”, haciendo la instalación rápida y económica.

El rol de los servicios de redes ha cambiado como resultado de la introducción de mercados eléctricos competitivos. La HVDC compacta es una nueva tecnología de transmisión de CD que tiene ventajas importantes para la aplicación en mercados competitivos. Estas ventajas incluyen: diseño en módulos, diseños estandarizados, cortos tiempos de entrega, estaciones compactas, cables que reducen el impacto ambiental y la controlabilidad de potencia y voltajes.

B.2 Diferencias entre la HVDC compacta y la HVDC clásica

B.2.1 Rango de potencia

La estación HVDC clásica es más efectiva en costo en el rango de alta potencia, por encima aproximadamente de 250 MW. La estación compacta, está en unidades con rangos de unas pocas decenas de MW hasta 300 MW y voltajes de CD arriba de ± 150 kV.

B.2.2 Modular

La estación compacta está basada en un concepto modular de medidas estandarizadas para estaciones convertidoras. La mayoría del equipo es encapsulado. La HVDC convencional es siempre hecha a la medida según la aplicación específica.

B.2.3 Circuitos convertidores

La HVDC Light es por naturaleza bipolar. El circuito de CD no está conectado a tierra. Por lo tanto sólo se necesitan dos conductores (cables).

B.2.4 Circuitos de estaciones convertidoras

Las estaciones convertidoras compactas son Convertidores de Fuentes de Voltaje (CFV) que emplean semiconductores de potencia de alta tecnología.

Por tanto, el circuito eléctrico es un poco diferente de la estación convertidora HVDC convencional:

Función en la estación convertidora	HVDC Convencional	HVDC compacta
Válvulas	Válvulas tiristores	Válvulas GTO
Conexión válvula-red de CA	Transformadores convertidores	Reactores en serie + transformador
Filtrado y compensación reactiva	50 % en filtros y capacitores en derivación	Sólo filtros pequeños
Alizamiento de la corriente en CD	Reactor de alizamiento + filtro de CD	Capacitor de CD
Telecomunicación entre los controles de las estaciones	Necesarios	No necesarios

Tabla B.1. Comparación entre estaciones HVDC convencional y compacta

B.2.5 Independencia con la red de CA

Como ya se mencionó la estación compacta no depende de la habilidad de red de CA para mantener voltajes y frecuencia estable. A diferencia de la HVDC convencional, la capacidad de corto circuito no es importante.

B.2.6 Función como Compensador Estático de Vars (CEV)

Las terminales de la HVDC convencional pueden controlar la potencia reactiva por medio del switcheo de filtros y bancos en derivación y en menor nivel con el control del ángulo de disparo. Pero este control requiere de equipo adicional y por lo tanto un costo extra. El control de la HVDC compacta hace posible crear cualquier ángulo de fase o amplitud, lo cual puede ser hecho casi instantáneamente. Esto ofrece la posibilidad de controlar la potencia activa y reactiva independientemente. De hecho el mismo convertidor puede ser usado como CEV y entonces es llamado CEV compacto.

B.3 BTB compacto de Eagle Pass/Piedras Negras

Eagle Pass es una comunidad en la frontera de México y E.U. con Piedras Negras, Coahuila. La carga de Eagle Pass es alimentada por dos líneas de transmisión de 138 kV y debido al crecimiento de la carga el área está propensa a inestabilidad en el voltaje ante contingencias de transmisión en periodos de carga máxima, reduciendo la confiabilidad en la entrega de potencia en el lado de los E.U. Durante emergencias, la energía para la red de distribución de Eagle Pass puede ser llevada desde México por una línea de 138 kV pero la conexión involucra operación de segregación de carga, por lo cual la energía se interrumpe por un corto periodo.

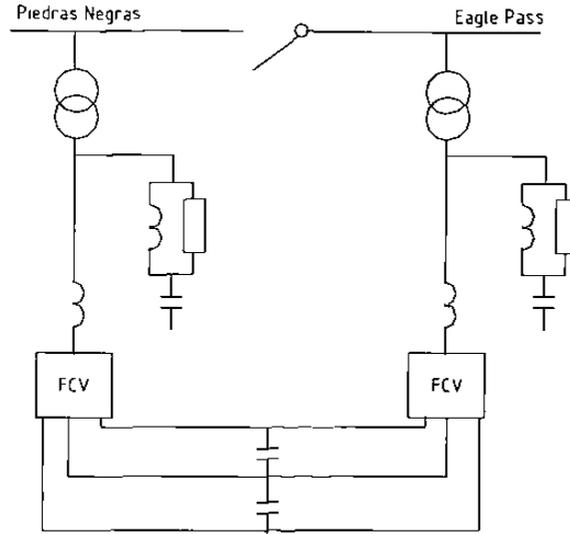


Figura B.2. Diagrama unifilar del BTB de Eagle Pass de 138 kV y 36 MVA.

Para mitigar la posible inestabilidad de voltaje y al mismo tiempo permitir intercambio de potencia en cualquier dirección entre México y E.U., se ha instalado un dispositivo Back to Back compacto de 36 MVA a 138 kV y puesto en servicio en la subestación Eagle Pass propiedad de Central Power and Light Company (CPL).

La primera opción evaluada fue la construcción de una línea de transmisión de 70 km de 138 kV dentro del área, adicional a las dos líneas de 138 kV existentes que alimentan el área de Eagle Pass desde las subestaciones Asherton y Hamilton Road. La segunda opción fue construir un enlace asíncrono entre E.U. y el lado mexicano de la subestación de Eagle Pass, permitiendo el soporte de voltaje para el área y permitiendo la importación inmediata de potencia dentro del área desde México, sin la necesidad de construir nuevas líneas.

B.3.1 Enlace Back to Back de Eagle Pass

La opción del BTB ofrece beneficios adicionales como permitir un intercambio de potencia entre México y E.U. en ambas direcciones sin interferir con el sistema que lo rodea, permitiendo a las partes el intercambio de energía. El BTB compacto añade valor al desempeño del sistema al actuar no sólo como enlace de potencia activa sino también, cuando se requiere, ofrece compensación dinámica de potencia reactiva en los sistemas de

CA en los dos lados del enlace, apoyando por lo tanto la estabilidad del voltaje en los sistemas de CA para varias condiciones de operación.

B.3.2 Características del enlace

El enlace está basado en la tecnología del Convertidor de Fuente de Voltaje (CFV), usando IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) como conmutador de estado sólido.

El enlace tiene una capacidad de 36 MVA a 138 kV. Comprende dos estaciones acopladas con el enlace de CD. Cada convertidor está conectado a la respectiva red de CA por medio de reactores de fase con núcleo de aire, dos filtros pasa altas en derivación (6 Mvar) y un transformador reductor.

El uso de los tiristores IGBT's de Eagle Pass permite un alto desempeño con una simple topología de convertidor. Los IGBT's pueden fácilmente ser conectados en serie sin la necesidad de circuitos voluminosos, permitiendo un voltaje en el convertidor de 18 kV_{RMS}. Esto permite la utilización de equipo de conmutación convencional en el enlace, mientras los niveles de corto circuito se mantengan bajos.

También, el esquema con IGBT es inherentemente un limitador de corriente, un hecho que permite la simplificación en el diseño del convertidor. Finalmente, la pequeña potencia requerida para el disparo en los IGBT's también contribuye al diseño compacto y robusto del convertidor.

B.3.3 Control y protección

El sistema de control y protección esta basado en tecnología avanzada de PC's industriales. La plataforma de control, el MACH 2, es común para los dispositivos FACTS y HVDC.

La interfase del operador también está basada en la PC. Normalmente, el control es llevado a cabo desde un centro de despacho remoto.

La protección del enlace es totalmente integrada al controlador MACH 2. Los algoritmos convencionales de protección son usados para el switcheo de alto voltaje y los transformadores reductores, mientras que esquemas de protección únicos han sido desarrollados para los módulos de las FCV y el enlace de CD.

La integración de la funcionalidad del control y la protección dentro del controlador MACH 2 permite al usuario desarrollar diagnósticos en línea de todos los subsistemas críticos del enlace.

B.3.4 Modos de operación del enlace

El enlace presenta una capacidad de operación sin precedentes, transferencia de potencia bidireccional controlada y control de voltaje en los lados de México y de E.U. El enlace puede ser operado para transferir 36 MW de potencia activa o proporcionar un soporte total de reactivos de +36 Mvar (función de STATCOM) a los dos extremos del enlace, o una combinación de potencia activa y reactiva dentro del rango de 36 MVA.

En el modo de STATCOM, con un arreglo de switcheo, ambos CFV pueden ser conectados a la red de 138 kV de México o de E.U. (aislada una de la otra), y funcionar como una STATCOM de ± 72 Mvar.

B.3.5 Arreglo de la estación

La estación compacta es colocada en un edificio dentro de cuatro módulos encapsulados, puestos juntos en el lugar. Hay un módulo para cada CFV, un módulo para el cuarto de control y uno para los sistemas auxiliares. Los intercambiadores de calor de agua a aire para el sistema de enfriamiento de la FCV están localizados en el exterior junto con el equipo de switcheo de alto voltaje.

APÉNDICE C

DATOS DE LAS REDES DE PRUEBA

C.1. Datos para el enlace asíncrono HVDC

Sistema 1

NODO	P_g	Q_g	P_c	Q_c	V_{pu}
1	--	--	0	0	1.05
2	0	0	100	10	--
3	0	0	100	10	--
4	--	--	0	0	1.05

Tabla C.1. Datos de nodos de la red 1

DE	A	R_{pu}	X_{pu}	$Y/2 pu$
1	2	0.01938	0.05917	0.02640
3	4	0.01938	0.05917	0.02640

Tabla C.2. Datos de líneas de la red 1

Parámetros del sistema de cd

	Convertidor 1	Convertidor 2
Bus de ca	Bus 2	Bus 3
Voltaje base de cd	100 kV	100 Kv
X_t	0.126 pu	0.0728 pu
X_c	0.126 pu	0.0728 pu
Admitancia del filtro B_f^*	0.478 pu	0.629 pu

* Los filtros son conectados al bus de ca.

Tabla C.3. Datos del subsistema de cd

Sistema 2

Los datos son los mismos del sistema 1

C.2. Datos del enlace HVDC en paralelo con el enlace en ca

NODO	P_g	Q_g	P_c	Q_c	V_{pu}
1	--	--	--	--	1.05
2	0.0	0.0	0.0	0.0	--
3	0.0	0.0	0.0	0.0	--
4	0.0	0.0	100.0	10.0	--
5	0.0	0.0	0.0	0.0	--
6	50.0	0.0	0.0	0.0	1.0

Tabla C.4. Datos de nodos de la red 2

DE	A	R	X	Y/2	TAP
1	2	0.0	0.001	0.0	1.0
2	3	0.01335	0.04211	0.0064	
3	4	0.01335	0.04211	0.0064	
4	5	0.01335	0.04211	0.0064	
5	6	0.0	0.001	0.0	1.0

Tabla C.5. Datos de líneas de la red 2

Parámetros del sistema de cd

Los parámetros del sistema *cd* son los mismos de la tabla C.3.

C.3. Datos de los casos con BTB en paralelo con línea de ca

NODO	P_g	Q_g	P_c	Q_c	V_{pu}
1	--	--	--	--	1.05
2	0.0	0.0	0.0	0.0	Vsp
3	50.0	0.0	100.0	10.0	1.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	--
5	0.0	0.0	0.0	0.0	--
6	0.0	0.0	0.0	0.0	--
7	0.0	0.0	0.0	0.0	Vsp

Tabla C.6. Datos de nodos de la red 3

DE	A	R	X	Y/2	TAP
1	2	0.0172	0.1456	0.1276	
2	4	0.0023	0.0195	0.0170	
3	4	0.0227	0.1932	0.1705	
2	5	0.000	0.010	0.000	1.0
4	7	0.0023	0.0195	0.0170	
6	7	0.000	0.010	0.000	1.0

Tabla C.7. Datos de líneas de la red 3

C.4. Datos del enlace asíncrono por medio de un BTB

Sistema 1

NODO	P_g	Q_g	P_c	Q_c	V_{pu}
1	--	--	--	--	1.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	--
3	0.0	0.0	100.0	10.0	Vsp
4	0.0	0.0	0.0	0.0	--

Tabla C.8. Datos de nodos de la red 4

DE	A	R	X	Y/2	TAP
1	2	0.01938	0.05917	0.02640	
2	3	0.0227	0.1932	0.1705	
3	4	0.000	0.001	0.000	1.0

Tabla C.9. Datos de líneas de la red 4

Sistema 1

Los datos son los mismos del sistema 1.

REFERENCIAS

- [1] ABB Power Systems AB, ABB Power Transmission, Eagle Pass/Piedras Negras BTB light.
- [2] W. F Tinney and C.E. Hart, "Power Flow Solution by Newton's Method", IEEE Trans. on Power App. and Syst., vol. PAS-86, pp 1449-1456, Nov. 1967.
- [3] B. Stott, O. Alsac. "Fast Decoupled Load Flow", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, pp 859-869, May/Jun 1974.
- [4] E. W. Kimbark, Direct current transmission, John Wiley & Sons, 1971.
- [5] D. A. Braunagel, L A. Kraft, J.L Whyson, Inclusion of dc transmission equations directly in a newton power flow, IEEE transactions on power apparatus and systems, Vol. PAS-95, no. 1, January/February 1976.
- [6] J.Reeve, G. Fahmy, B.Stott, Versatile load flow for multiterminal HVDC systems, , IEEE transactions on power apparatus and systems, Vol. PAS-96, no. 3, May/June 1977.
- [7] M.M El-Marsafawy, R. M. Mathur, A new, fast technique for load-flow solution of integrated multi-terminal dc/ac systems, IEEE transactions on power apparatus and systems, Vol. PAS-99, no. 1, Jan/Feb 1980.
- [8] J. Arrillaga, High voltage direct current transmission,
- [9] J. Arrillaga y C.P. Arnold, Computer modelling of electrical power systems, John Wiley & Sons, 1983.
- [10] F. Aboytes García, Análisis de sistemas de potencia, 1990.
- [11] J. J. Grainger y W. D. Stevenson Jr., Análisis de sistemas de potencia, McGraw Hill, 1996.
- [12] Hingorani, High voltage dc transmisión, IEEE Spectrum, Abril 1996.
- [13] F. Aboytes, F. Sánchez y R.Ramírez, Simulador Interactivo de Sistemas de Potencia SISP-PC, Manual del usuario, Departamento de Investigación y Desarrollo, CENACE-CFE, Mayo 1993.
- [14] S. Nakamura, Análisis numérico y visualización gráfica con MATLAB[®], Prentice may, 1997.

- [15] S. Chávez Negrete, Formulación de flujos óptimos en forma rectangular por el método de Newton incorporando dispositivos FACTS, Tesis de Maestría UANL, Octubre 1999.
- [16] Narain G. Hingorani and Laszlo Gyugyi, Understanding Facts, IEEE Press

