



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA – CONTROL

CONTROL INTELIGENTE PARA LA REGULACIÓN DE POTENCIA
EN SISTEMAS HVDC

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ÁNGEL MARTIN ORTIZ TORRES

TUTORES PRINCIPALES
DR. PAUL ROLANDO MAYA ORTIZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DR. MARCOS ÁNGEL GONZÁLEZ OLVERA
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX., SEPTIEMBRE 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA - CONTROL

CONTROL INTELIGENTE PARA LA REGULACIÓN DE POTENCIA
EN SISTEMAS HVDC

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ÁNGEL MARTÍN ORTIZ TORRES

TUTORES PRINCIPALES
DR. PAUL ROLANDO MAYA ORTIZ Y DR. MARCOS ÁNGEL
GONZÁLEZ OLVERA
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX., SEPTIEMBRE 2023

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Benítez Pérez Héctor
Secretario: Dr. Angeles Camacho César
Vocal: Dr. Maya Ortiz Paul Rolando
1er. Suplente: Dr. González Olvera Marcos Ángel
2o. Suplente: Dr. Vieyra Valencia Natanael

La tesis se realizó en el laboratorio de control no lineal del Posgrado de la Facultad de Ingeniería.

TUTORES DE TESIS:

Dr. Paul Rolando Maya Ortiz Dr. Marcos Ángel González Olvera

A los que nunca dejan de creer en mí. Por su soporte, su comprensión y por su amor.

Por y para ustedes.

Reconocimientos

Al colegio de control. Compartir el conocimiento, la experiencia y la visión de una disciplina tan compleja e increíble como es la teoría de control, es una labor que merece un reconocimiento especial.

A mis tutores, que me acompañaron a lo largo de todo el camino para completar este trabajo de investigación. Por su guía en la materia y por los múltiples consejos a lo largo de tantas pláticas.

Al Posgrado de ingeniería, que me abrió el espacio necesario para desarrollar el presente trabajo.

A mis compañeros de laboratorio, que siempre estuvieron en la disposición de compartir experiencias para solventar dificultades y atentos para motivarnos en esta labor tan exigente.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico que me permitió cursar este programa de posgrado.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme tener acceso a experiencias tan diversas y enriquecedoras y permitirme alcanzar objetivos profesionales y personales que son invaluableles.

Declaración de autenticidad

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

Ángel Martín Ortiz Torres. Ciudad Universitaria, CD.MX., SEPTIEMBRE 2023

A los que fuimos,

Por los tiempos heroicos.

A los que somos,

*"Hoy más que nunca es preciso soñar.
Soñar, juntos, sueños que se desensueñen y en materia mortal encarnen."
Eduardo Galeano*

A los que seremos,

*"...que los justos avancen
aunque estén imperfectos y heridos
que avancen porfiados como castores
solidarios como abejas
aguerridos como jaguares
y empuñen todos sus noes
para instalar la gran afirmación
que la muerte pierda su asquerosa puntualidad

que cuando el corazón se salga del pecho
pueda encontrar el camino de regreso
que la muerte pierda su asquerosa
y brutal puntualidad
pero si llega puntual no nos agarre
muertos de vergüenza
que el aire vuelva a ser respirable y de todos
y que vos muchachita sigas alegre y dolorida
puniendo en tus ojos el alma
y tu mano en mi mano

y nada más
porque el cielo ya está de nuevo torvo
y sin estrellas
con helicóptero y sin dios. "*

Mario Benedetti

Resumen

El crecimiento en la oferta de soluciones y tecnología desarrollada para enfrentar las necesidades del mercado de energía eléctrica, ha hecho uso de diferentes métodos y estrategias que diversifican la manera en la que se gestionan los recursos energéticos y la infraestructura utilizada en la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica.

Dentro de las estructuras con mayor crecimiento se encuentra la transmisión en corriente directa de alto voltaje, las cuales, se ven incentivadas por la incorporación de sistemas de conversión de potencia y la integración de generación distribuida, propiciando a su vez, el crecimiento de instalaciones basadas en fuentes de energía renovable que operan en un régimen de corriente directa.

Es en este contexto, el presente trabajo describe el diseño de un controlador inteligente para la regulación de potencia en sistemas de transmisión de alto voltaje en corriente directa o sistemas de transmisión HVDC, por sus siglas en inglés.

El enfoque presentado en esta tesis parte del estudio de los convertidores de potencia como el bloque principal en la construcción de enlaces HVDC, en donde, se habla de las técnicas de conversión basadas en modulación y conmutación de alta frecuencia, definiendo así un modelo promediado que es útil para el estudio dinámico del sistema.

En las estaciones de conversión se integra un controlador local diseñado con un enfoque inteligente utilizando la teoría de sistemas difusos y basado en el modelo difuso Takagi-Sugeno (T-S), cuyo objetivo de control estará definido a partir de su función dentro de una red. El desempeño es evaluado mediante simulaciones numéricas en diferentes escenarios de operación.

Para conocer el punto de operación de esta red, de manera similar a los sistemas eléctricos de potencia en corriente alterna, se utiliza un modelo algebraico diferencial de la red, que permite capturar diferentes fenómenos asociados a la operación del sistema.

Índice general

Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XV
1. Introducción	3
1.1. Redes HVDC	3
1.2. Estado del arte	5
1.3. Motivación	7
1.4. Planteamiento del problema	7
1.5. Objetivos	8
1.6. Contribuciones	8
1.7. Estructura de la tesis	9
2. Sistemas VSC-HVDC	11
2.1. Convertidores de potencia de fuente conmutada de voltaje VSC	11
2.2. Modelo dinámico de un convertidor VSC	15
2.3. Modelo del VSC en coordenadas dq	16
2.4. Enlaces VSC-HVDC	19
3. Diseño de un control difuso para redes VSC-HVDC	23
3.1. Enlace VSC-HVDC de tres terminales	24
3.1.1. Condiciones iniciales	26
3.2. Control difuso Takagi-Sugeno	28
3.2.1. Diseño de un controlador basado en LMI de un modelo difuso T-S	29
3.3. Diseño de un controlador difuso T-S para convertidores VSC	31
3.3.1. Diseño de un controlador difuso para un convertidor VSC_{slack}	32
3.3.2. Diseño de un controlador difuso para un convertidor VSC_{sch}	36
3.4. Simulación de una red MT VSC-HVDC de tres terminales con control difuso T-S	40
4. Conclusiones y trabajo a futuro	47
4.1. Trabajo a futuro	49

ÍNDICE GENERAL

A. Reducción de Kron	51
A.1. Reducción de Kron del enlace VSC-HVDC de tres terminales	52
B. Flujos de potencia con el método de Newton-Raphson	57
C. Programa para la solución de LMIs	61
Bibliografía	63

Índice de figuras

2.1. Circuito de un convertidor trifásico de dos niveles	12
2.2. Modulación SPWM: (a) Comparador y señal PWM; (b) Señales de referencia y portadora; (c) PWM resultante; (d) Componente fundamental extraída del PWM resultante.	13
2.3. Circuito equivalente de un VSC en estado estacionario	14
2.4. Representación esquemática de un VSC	15
2.5. Circuito equivalente en el marco dq	17
2.6. Conexión y aplicaciones de enlaces VSC-HVDC	20
2.7. Enlace monopolar con retorno metálico	20
2.8. Enlace Bipolar: a) <i>Back-to-back</i> y b) <i>point-to-point</i>	21
2.9. Configuración de enlace de tres terminales	21
3.1. Enlace VSC-HVDC de Tres Terminales	25
3.2. Enlace VSC-HVDC de Tres Terminales reducida	27
3.3. Controlador difuso	29
3.4. Funciones de membresía para el VSC_{slack}	33
3.5. Respuesta del VSC_{slack}	35
3.6. Potencia en las terminales del VSC_{slack}	35
3.7. Error de regulación	36
3.8. Funciones de membresía para el VSC_{sch}	37
3.9. Respuesta del VSC_{sch}	39
3.10. Potencia en las terminales del VSC_{sch}	39
3.11. Error de regulación de Potencia P_{dc}	40
3.12. Voltaje en terminales de los convertidores VSC	42
3.13. Potencia de los convertidores VSC	43
3.14. Estados del VSC_{slack}	44
3.15. Estados del VSC_{sch}	45
3.16. Estados del VSC_{pass}	45

Índice de tablas

3.1. Variables de la red equivalente del enlace HVDC	27
3.2. Parámetros de la red	41

Nomenclatura

DC	—	Direct Current (Corriente Directa)
AC	—	Altern Current (Corriente Alterna)
HVDC	—	High voltage Direct Current (Alto Voltaje de Corriente Directa)
MT	—	Multiterminal
DG	—	Distributed Generation (Generación Distribuida)
FACTS	—	Flexible AC Transmission Systems (Sistemas de Transmisión de Corriente Alterna Flexibles)
PCC	—	Point of Common Coupling (Punto de conexión o acoplamiento)
SSC	—	System Supervision Control (Control de Supervisión del Sistema)
PCS	—	Power Conversion System (Sistema de Conversión de Potencia)
VSC	—	Voltage Source Converter (Convertidor de Fuente de Voltaje)
VSR	—	Voltage Source Rectifier (Rectificado de Fuente de Voltaje)
VSI	—	Voltage Source Inverter (Inversor de Fuente de Voltaje)
STATCOM	—	Compensador Estático Síncrono
PLL	—	Phase Locked Loop (Lazo de Enganche de Fase)
SEP	—	Sistema Eléctrico de Potencia
DAE	—	Differential Algebraic Equations (Ecuaciones Algebraicas Diferenciales)
p.u	—	por unidad (unidades de medición)

Introducción

La evolución en el uso y demanda de energía eléctrica es un fenómeno que motiva la investigación y el desarrollo de nuevos métodos, dispositivos y estrategias que satisfagan las necesidades del mercado a partir del uso eficiente e intensivo de recursos tecnológicos de bajo impacto para el medio ambiente. En este sentido, el crecimiento en la capacidad de cómputo y el manejo de datos, así como la mayor disponibilidad y oferta de dispositivos electrónicos de potencia, han propiciado el surgimiento de redes eléctricas capaces de integrar y gestionar diferentes fuentes de generación que, de una manera eficaz y sostenible, son capaces de cubrir la creciente demanda energética.

Derivado de esta constante evolución en los sistemas eléctricos de potencia, existe una creciente integración de cargas y generación en corriente directa (DC por sus siglas en inglés), donde los dispositivos de conversión juegan un papel determinante, incrementando los grados de libertad y cambiando los esquemas convencionales que se han manejado, y que condicionan y determinan el funcionamiento en las etapas de generación, transmisión y distribución de las redes convencionales de potencia.

1.1. Redes HVDC

El desarrollo de sistemas eléctricos de potencia basados en corriente directa ha tenido lugar desde el siglo anterior con aplicaciones específicas en redes de transmisión de alto voltaje en corriente directa (HVDC, por sus siglas en inglés), telecomunicaciones, control y protección en sistemas de potencia convencionales [1].

Sin embargo, en los últimos años se manifiesta un crecimiento natural en la incorporación de bloques y segmentos que operan en corriente directa en todas las etapas de los SEP. Como se mencionó anteriormente, no solo la necesidad de incorporar diferentes fuentes de generación que ayuden a reducir el impacto ambiental generado por los procesos convencionales basados en combustibles fósiles, si no también, la creciente demanda en inmuebles residenciales y comerciales que acumulan una gran cantidad de

1. INTRODUCCIÓN

cargas en corriente directa como parte de su funcionamiento, incentivan la creación de estrategias que permitan integrar soluciones energéticas más eficientes y robustas ante fallas y perturbaciones en la generación y la demanda de energía eléctrica. Finalmente, se tienen las redes de transmisión de alto voltaje de corriente directa que han demostrado una mayor eficiencia contra los sistemas en un régimen de corriente alterna en la transmisión de energía a diferentes niveles de voltaje con una reducción significativa en la pérdida por efectos de calor así como en diversas aplicaciones, donde, la ausencia de frecuencia eléctrica y flujo de potencia reactiva representan ventajas para la operación de redes interconectadas [2].

Las redes eléctricas en régimen HVDC comenzaron a construirse a partir de convertidores formados por tiristores de conmutación en línea, es decir, que se activan según el sentido de la señal y el valor de la corriente de entrada, conocidos como convertidores conmutados de fuente de corriente (CSC, por sus siglas en inglés). Posteriormente, se propuso un sistema HVDC basado en convertidores de fuente conmutada de voltaje (VSC, por sus siglas en inglés) regulados por una técnica de modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés), donde se encontraron beneficios importantes en costos y desempeño como bien lo detalla [3].

El surgimiento de interruptores semiconductores autoconmutables de alta potencia como el transistor bipolar de compuerta aislada (IGBT, por sus siglas en inglés), ha permitido un mayor desarrollo de sistemas basados en convertidores tipo VSC para la transmisión de potencia a niveles altos de tensión denominados Enlaces VSC-HVDC [4], los cuales, brindan mayor flexibilidad permitiendo la conexión y el intercambio potencia entre sistemas con diferentes parámetros de operación y han dado pie al surgimiento de diferentes topologías de red.

Las diferentes configuraciones que se derivan de la interconexión de enlaces HVDC se clasifican de la siguiente forma: *i) enlace monopolar*, compuesto por un solo conductor donde el circuito se cierra con una tierra física y por un medio conductor como el agua, *ii) enlace bipolar*, con dos conductores y dos convertidores en cada terminal con una conexión a tierra entre ellos, donde cada polo puede operar de manera independiente, *iii) enlace homopolar*, que cuenta con dos o más conductores con la misma polaridad donde el retorno se hace por medio de tierra. Estas configuraciones de operación se forman a través de enlaces *a) Back-to-back* para operación monopolar o bipolar con el propósito de interconectar redes a través de la conexión directa de dos convertidores VSC, *b) Point-to-point* de dos terminales con líneas bipolares y operación monopolar que son útiles durante alguna contingencia y los enlaces *c) Multiterminal* donde se forma una red de DC a partir de la conexión de tres o más nodos de AC por medio de estaciones de conversión VSC [5].

De acuerdo al panorama descrito anteriormente, las redes de DC se han convertido en una alternativa viable para la integración de fuentes de generación distribuida,

donde la interconexión de redes de DC permite aumentar los grados de libertad para controlar al sistema [6, 7]. Es por ello que se ha motivado el desarrollo de soluciones no solo para la transmisión sino también para redes de distribución en DC [7].

Si bien se han mencionado las principales características y las ventajas que se derivan de las redes formadas por enlaces HVDC, es importante también mencionar, los nuevos retos de control que surgen de este escenario. Uno de los primeros que saltan a la vista es la naturaleza no lineal de los convertidores de potencia [8], los cuales representan el bloque principal para la construcción de sistemas HVDC. Por otro lado, la naturaleza intermitente de algunas fuentes de energía renovable incrementa la complejidad en la gestión y control de la red, lo cual, se suma a la difícil tarea que representa trabajar con un sistema altamente interconectado y se vuelve menos evidente la separación entre las escalas de tiempo sobre las que deben trabajar los controladores en las diferentes etapas de generación, transmisión y distribución [9].

1.2. Estado del arte

La integración de tecnología basada en convertidores VSC es una tarea que necesita satisfacer de manera segura y eficiente el cumplimiento de diferentes objetivos de regulación de acuerdo al comportamiento de un sistema eléctrico de potencia a diferentes escalas de tiempo. El uso de arquitecturas jerárquicas es una de las prácticas más utilizadas para tratar con este tipo de escenarios, donde se forman lazos anidados de control que trabajan a diferentes escalas de tiempo y cada uno se encarga de proporcionar referencias a un lazo más interno [10, 11].

En la literatura se pueden encontrar diversas estrategias de control diseñadas a partir del modelo lineal de un solo convertidor AC/DC, las cuales se basan principalmente en lazos anidados y uno de los esquemas más utilizados es el *control de corriente* o *current control*. Algunos métodos utilizan compensadores tipo Proporcional-Integral (PI) con un lazo interno que controla la corriente y un lazo externo que regula el voltaje del capacitor de lado de DC [12, 13], otros han utilizado técnicas de optimización para diseñar un control por retroalimentación de estado a partir de la técnica de ubicación de polos [14, 15].

Aunque existen antecedentes del siglo anterior donde se menciona el uso de controladores lineales que por medio del control de corriente logran mantener un nivel de potencia deseado, también se hace mención de las limitaciones que tienen este tipo de controladores ante variaciones paramétricas, retardos, no linealidades y el rango amplio de operación que tiene un sistema de esta naturaleza [16]. Por este motivo, se han desarrollado algunos otros enfoques como el presentado en [17] donde se utilizan técnicas de linealización parcial y se desarrolla el estudio de la dinámica cero del sistema a partir de la elección de diferentes salidas, en donde, se muestra la pertinencia de la

regulación por control de corriente fijando referencias de corrientes deseadas, se define un error de seguimiento tal que se consigue una regulación indirecta del voltaje en el bus de DC y se encuentra que la dinámica cero tiene dos puntos de equilibrio estables y se remarca la existencia de una singularidad cuando el voltaje del capacitor es cero. Finalmente, se propone un término virtual de control para la dinámica cero con el que se busca robustecer el seguimiento utilizando un control PI adicional. Sin embargo, se tiene una fuerte dependencia del modelo y se vuelve susceptible a errores ocasionados por variaciones en los parámetros y mediciones.

Otro enfoque es presentado en [9] donde se utilizan modelos puerto-Hamiltoniano (pH, por sus siglas en inglés) y teoría de grafos para estudiar las interconexiones de una red HVDC. En este trabajo se usan rectificadores de fuente de voltaje o voltage sourced rectifiers (VSR's) como dispositivos de conversión de potencia. Una de las principales contribuciones es la prueba de que el modelo incremental define un mapa pasivo respecto a una salida diseñada de manera adecuada. Finalmente, se demuestra de manera formal no solo que se puede diseñar un controlador PI basado en pasividad (PBC, por sus siglas en inglés) que estabiliza global y asintóticamente cualquier punto de operación asignable, sino que también se prueba que la dinámica cero asociada a la salida seleccionada es estable. En las simulaciones presentadas puede verse que el controlador tiene un buen desempeño, sin embargo, se observa una respuesta lenta comparada con controladores con la misma estructura.

Por otro lado, se han venido desarrollando soluciones diversas que han explorado la teoría de control inteligente para encontrar soluciones a los problemas de control en sistemas de potencia. Ya en la década de 1990 [18] plantea una comparación entre técnicas tradicionales basadas en un controlador PI y técnicas de control inteligente usando redes neuronales artificiales (ANN por sus siglas en inglés) y lógica difusa (FL por sus siglas en inglés) para controlar un enlace de transmisión HVDC, donde se intenta mostrar una mejoría en la respuesta del control ante perturbaciones. Al igual que los casos anteriores, el controlador recibe el error de corrientes como entrada. Finalmente, se realiza una comparación gráfica de la respuesta del sistema cuando se utiliza un control PI tradicional, un control basado en ANN y un control basado en ANN-FL y se demuestra que el controlador ANN basado en lógica difusa es robusto ante fallas en la red, cambios en la referencia e incertidumbre paramétrica.

Dentro de la literatura, también se pueden encontrar controladores convencionales que integran compensadores construidos con técnicas inteligentes para mejorar su desempeño. En [19] se utiliza un control PI y se auxilia de un módulo *autoadaptable* que por medio de métodos difusos se adapta a las condiciones de trabajo y ajusta los parámetros del controlador PI para un modelo en el marco de referencia $\alpha\beta$ con el que se busca regular la potencia de salida y satisfacer la demanda de una red pasiva. En [20] se propone un control *Fuzzy-MPC* libre de modelo, donde argumenta el incremento en la robustez gracias a su capacidad de ajustar su solución a las incertidumbres del

modelo, el desconocimiento de las cargas y los parámetros de otras redes interconectadas, utilizando un modelo difuso Takagi-Sugeno (T-S) identificado en línea a partir de una representación entrada-salida. Esta idea de utilizar herramientas de diferentes enfoques de control se retoma en [21] y [22] donde se explotan las características de un control robusto por modos deslizantes que se apoya en técnicas difusas y neuro-difusas para integrar compensadores adaptables a la ley de control que mejoran la respuesta del controlador.

1.3. Motivación

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, el desarrollo de redes HVDC es no solamente una manera de incentivar la integración de fuentes de generación distribuida que mitigan el uso de combustibles fósiles en el proceso de generación de energía eléctrica, si no también una herramienta que ayuda a incrementar la confiabilidad, robustez y seguridad de la operación de sistemas eléctricos de potencia gracias a que es capaz de interconectar diferentes tipos de redes y permitir un mayor intercambio de potencia.

Sin embargo, este escenario requiere también de la creación de esquemas de supervisión, control y regulación con la capacidad de integrar en su diseño todas estas características y compensar la mayor cantidad de desbalances y perturbaciones que pudiera presentar un sistema altamente interconectado, con comportamientos no lineales y variaciones en sus parámetros.

A pesar de que, como ya se ha mostrado en la revisión de la literatura, existen una gran variedad de enfoques sobre los cuales se pueden diseñar soluciones que se utilizan intensivamente en la práctica, el explorar nuevas soluciones de control es una tarea con una gran área de oportunidad. En ese sentido, este trabajo se enfoca en el diseño de un controlador local, descentralizado que pueda satisfacer los objetivos de potencia y voltaje demandados en la operación de una red HVDC Multiterminal (MT) basada en convertidores VSC.

1.4. Planteamiento del problema

Es común el uso de esquemas jerárquicos de control formados por lazos anidados, donde cada lazo trabaja en una escala de tiempo diferente y envía referencias a un lazo más interno para satisfacer un conjunto de objetivos de control en diferentes escalas de tiempo sobre las que trabajan los SEP [11]. En el caso de los sistemas VSC-HVDC, el lazo más interno es el encargado de regular la potencia en las terminales de la estación de conversión por medio del control de corriente, recordando que el convertidor puede operar como una fuente rectificadora de voltaje (VSR, por sus siglas en inglés) o como

una fuente inversora de voltaje (VSI, por sus siglas en inglés).

Dado un arreglo MT que integra unidades de generación con fuentes de energía renovable, microgeneración y conexiones con redes convencionales de AC, así como cargas con demanda de potencia activa y reactiva. El problema de control reside en proponer un esquema de control no lineal que permita la regulación de potencia en terminales de las estaciones VSC en un punto de operación de la red. Así mismo, el control de voltaje y corriente propuesto para los convertidores VSC debe garantizar el funcionamiento adecuado de la red de DC, permitiendo el intercambio de potencia apropiado entre los convertidores. Desglosando el problema de control, se tendrán las siguientes tareas:

- Análisis de componentes, mediciones disponibles y estructura de un sistema VSC-HVDC Multiterminal y su modelo no lineal.
- Explorar técnicas de control no lineal para la regulación de potencia en las terminales de la estación VSC en un punto de operación de la red.
- Control de voltaje y corriente en las estaciones VSC de una red VSC-HVDC Multiterminal tal que permita el intercambio apropiado de potencia para alcanzar el punto de operación deseado en estado estacionario.

1.5. Objetivos

El objetivo central de este trabajo es el desarrollo de un esquema de control descentralizado capaz de regular la potencia de convertidores VSC utilizando herramientas de control inteligente.

De forma puntual, este trabajo cubre los siguientes objetivos:

1. Incorporar en el análisis la dinámica no lineal de los convertidores VSC en redes VSC-HVDC.
2. Diseñar un esquema de control con técnicas de control inteligente que mejore el funcionamiento las estaciones de conversión VSC y extienda el rango de operación de una red VSC-HVDC.
3. Evaluar el desempeño del controlador en una red VSC-HVDC.

1.6. Contribuciones

El cumplimiento de los objetivos anteriores permite plantear de forma anticipada las siguientes aportaciones:

- Se trabaja en una vecindad del punto de operación de la red explotando las no linealidades del sistema.
- Se resuelven problemas de interés en la comunidad de sistemas eléctricos de potencia a través de técnicas de análisis y control de sistemas no lineales.
- Se presenta la integración del controlador descentralizado en una red con enlaces VSC-HVDC.
- Se obtiene una mejora en el desempeño del sistema controlado con el aprovechamiento de modelos dinámicos existentes y herramientas basadas en datos y conocimiento del sistema.

1.7. Estructura de la tesis

El contenido del presente trabajo esta organizado de la siguiente manera.

Capítulo 2: En este capítulo se presentan las herramientas teóricas y algunos aspectos técnicos que ayudan a poner en contexto el problema y permiten vislumbrar de manera más completa el proceso utilizado para el planteamiento de una solución, partiendo de las definiciones básicas de los convertidores de potencia, pasando por el análisis dinámico de una estación de conversión, hasta llegar a la representación matemática de una red del tipo VSC-HVDC Multiterminal.

Capítulo 3: En este capítulo se encuentra el planteamiento de las herramientas utilizadas para el diseño e implementación de un control inteligente. Se presenta a detalle la red utilizada como caso de estudio para evaluar el desempeño de los controladores propuestos a partir de los resultados de simulación obtenidos.

Capítulo 4: En este capítulo se incluyen las observaciones más relevantes que se encontraron a lo largo del desarrollo de este trabajo. De igual manera, se construyen las conclusiones particulares que permiten puntualizar el camino entre los objetivos planteados y los resultados obtenidos. Finalmente, se deja un espacio para argumentar las aportaciones realizadas y las preguntas que quedan abiertas para el trabajo futuro.

Sistemas VSC-HVDC

En este capítulo se presenta de manera concisa el desarrollo teórico de los principales conceptos y herramientas de análisis que se utilizan a lo largo del trabajo, con el fin de contar con una estructura ordenada que permita observar la conexión entre el planteamiento del problema y el desarrollo de la solución propuesta.

También se presentan los elementos principales de un sistema VSC-HVDC y se hace mención de las características que se consideran para el estudio y desarrollo de una solución al problema de control y regulación de potencia.

2.1. Convertidores de potencia de fuente conmutada de voltaje VSC

Un VSC es un dispositivo capaz de convertir una señal de corriente alterna a una de corriente directa y viceversa, lo que permite el intercambio de potencia entre redes que trabajan bajo un esquema o régimen de frecuencia diferente. Las topologías básicas son la de puente completo de una sola fase y la de tres niveles con punto neutro fijo. Sin embargo, la topología más común es la de un VSC trifásico de dos niveles que integra tres arreglos idénticos de medio puente H como se muestra en la Figura 2.1 que se presenta en [17] y que ofrece un flujo bidireccional de potencia entre el lado de DC y la red de AC [23]. En todos los casos, los arreglos están formados por interruptores de potencia como IGBTs, que permiten aumentar el nivel de voltaje de acuerdo a la cantidad de interruptores usados en el arreglo, tienen además un diodo que hace las veces de protección contra voltajes inversos, mientras que el capacitor ayuda a tener una señal de voltaje estable del lado de DC [24, 25]. Para controlar los dispositivos IGBT se utilizan señales de conmutación que se generan por medio de técnicas de modulación. Las funciones p_a , p_b y p_c representan las acciones de conmutación para cada uno de los seis interruptores y están definidas de la siguiente forma:

$$p_j = \begin{cases} 1, & S_j \text{ cerrada} \\ -1, & \bar{S}_j \text{ cerrada} \end{cases} \quad j = a, b, c$$

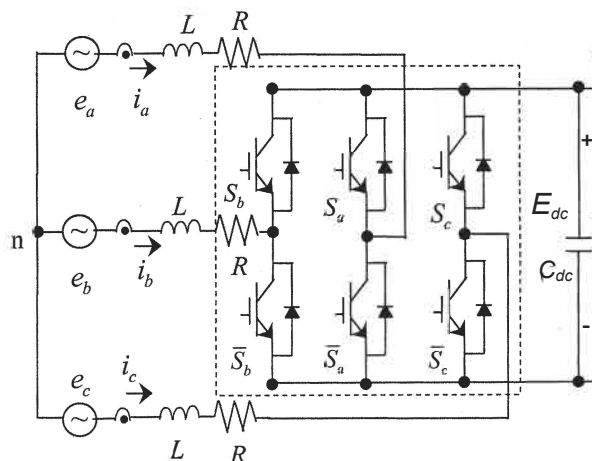


Figura 2.1: Circuito de un convertidor trifásico de dos niveles

Dentro de las técnicas de modulación más utilizadas están las basadas en la modulación de ancho de pulso, que suelen ser no solo simples sino efectivas. Esta consiste en comparar una señal periódica de alta frecuencia denominada *portadora*, que comúnmente es una señal triangular, con una señal también periódica pero de variación más lenta conocida como *moduladora*. Los cruces entre las dos señales determinan el estado de encendido de los interruptores [26].

Cuando la señal *moduladora* tiene forma senoidal, como se muestra en la Figura 2.2, retomada de [27], la técnica recibe el nombre de *modulación de ancho de pulso senoidal* o SPWM por sus siglas en inglés. Generalmente la conmutación se da a altas frecuencias, lo que ayuda a reducir componentes armónicos de baja frecuencia, sin embargo, se tienen más armónicos de alta frecuencia e incrementa el número de pérdidas por conmutación, por lo tanto, es necesario encontrar un valor óptimo de conmutación.

En la técnica SPWM se tienen las siguientes variables de modulación para las 3 fases [23]:

$$m_a(t) = m \cdot \sin(\omega t + \phi_V) \quad (2.1a)$$

$$m_b(t) = m \cdot \sin\left(\omega t + \phi_V - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (2.1b)$$

$$m_c(t) = m \cdot \sin\left(\omega t + \phi_V + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (2.1c)$$

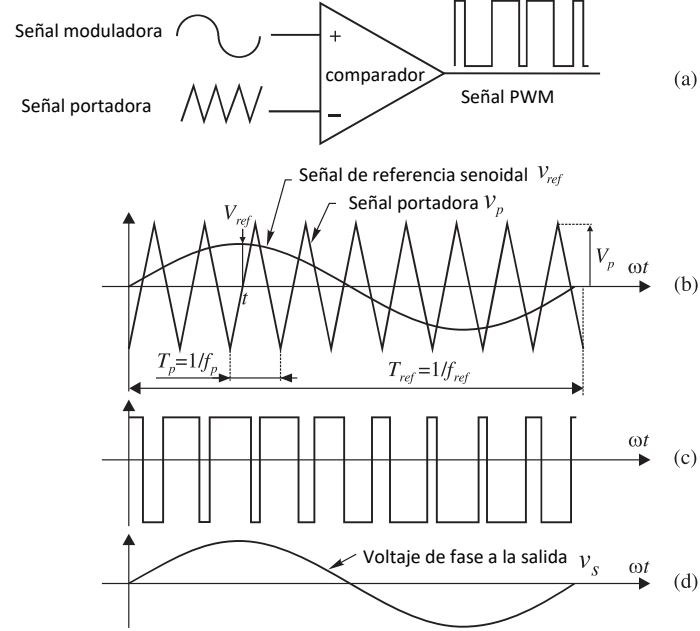


Figura 2.2: Modulación SPWM: (a) Comparador y señal PWM; (b) Señales de referencia y portadora; (c) PWM resultante; (d) Componente fundamental extraída del PWM resultante.

el ángulo ϕ corresponde al ángulo de fase relativo a la referencia del sistema, m representa el índice de modulación del convertidor.

Entonces el voltaje en las terminales de AC del VSC queda definido como sigue:

$$v_a = \frac{1}{2} E_{dc} m_a(t) \quad (2.2a)$$

$$v_b = \frac{1}{2} E_{dc} m_b(t) \quad (2.2b)$$

$$v_c = \frac{1}{2} E_{dc} m_c(t) \quad (2.2c)$$

donde E_{dc} es la magnitud del voltaje de DC en las terminales del capacitor C_{dc} .

La máxima amplitud de voltaje se alcanza cuando la señal de referencia o moduladora tiene la misma amplitud que la señal portadora [27], tal que: $|m_a| = |m_b| = |m_c| = 1$. Entonces la relación de voltaje de DC y el voltaje de línea AC tiene la siguiente forma:

$$V_a = \sqrt{\frac{3}{8}} E_{dc} m \angle \phi_V \quad (2.3a)$$

$$V_b = \sqrt{\frac{3}{8}} E_{dc} m \angle \left(\phi_V - \frac{2}{3} \pi \right) \quad (2.3b)$$

$$V_c = \sqrt{\frac{3}{8}} E_{dc} m \angle \left(\phi_V + \frac{2}{3} \pi \right) \quad (2.3c)$$

Los sistemas de conversión de potencia operan en un régimen de conmutación de alta frecuencia que torna complicado su estudio por el carácter discontinuo que esto representa. De ahí, en trabajos como [28, 29] se presenta un análisis que deriva en la representación conocida como *modelo de valor promedio* o *modelo promediado*, el cual es una aproximación del modelo original donde los efectos de conmutación son mitigados al promediar el comportamiento del sistema en un periodo de trabajo.

De esta manera, se puede establecer un circuito equivalente. Anteriormente se utilizaba una fuente de voltaje variable con una impedancia de acoplamiento para representar a los convertidores de un enlace VSC-HVC, esta consideración complica la resolución de la red [30, 31, 32]. Motivados por esa situación, se ha propuesto una representación de un VSC de dos puertos [33, 34], como se muestra en la Figura 2.3. Esta representación permite analizar el comportamiento del convertidor en estado estacionario en redes de corriente directa y resolver los flujos en la red de AC y en los enlaces de DC, ya sea con técnicas secuenciales o utilizando métodos unificados.

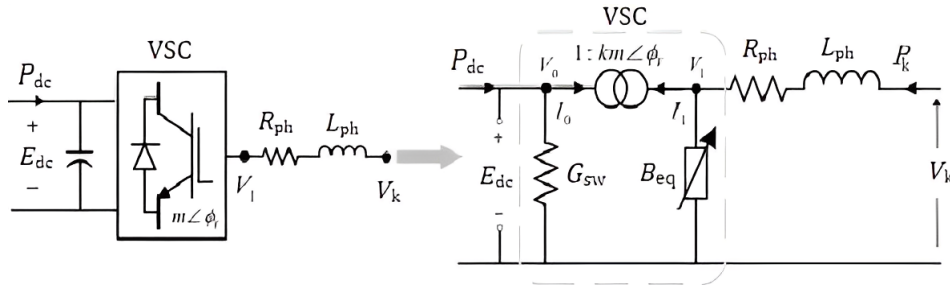


Figura 2.3: Circuito equivalente de un VSC en estado estacionario

El convertidor esta compuesto por un transformador LTC con tap complejo, el nodo 1 se puede ver como un nodo interno de AC del VSC y el nodo 0 corresponde entonces a un nodo interno de DC. Los elementos L_{ph} y R_{ph} representan la reactancia inductiva y la resistencia del acoplamiento del VSC con la red de AC. Del lado de DC se tiene un capacitor denominado C_{dc} , que se usa para estabilizar el voltaje en terminales E_{dc} . Las pérdidas por conmutación están dadas por la conductancia G_{sw} y por su lado, la absorción o generación de potencia reactiva está dada en la susceptancia variable B_{eq} .

Se puede observar que el voltaje de fase en las terminales del convertidor esta dado de la siguiente manera:

$$V_1 = kE_{dc} \cdot m \angle \phi_V \quad (2.4)$$

donde m representa la relación de transformación y corresponde al índice de modulación del VSC, mientras que $k = 3/8$ es la constante del convertidor de 2 niveles, ϕ es el ángulo de fase del fasor de voltaje V_1 .

En este modelo se puede obtener una relación entre las corrientes de entrada y salida con los voltajes en las terminales de AC y el puerto de DC, esto queda dado en función del ángulo de fase ϕ_V , del índice de modulación y del valor de la susceptancia variable B_{eq} , como se muestra en la ecuación (2.5).

$$\frac{V_k}{E_{dc}} = k \cdot m \angle \phi_V, \quad \frac{I_0}{I_1} = k \cdot m \angle \phi_V \quad (2.5)$$

2.2. Modelo dinámico de un convertidor VSC

De manera general una estación de conversión, además del convertidor que ya se ha analizado a detalle, incluye en el lado de AC transformadores y filtros, mientras que en el lado de DC cuenta con elementos auxiliares, dispositivos de conmutación y bancos de capacitores como lo muestra la Figura 2.4.

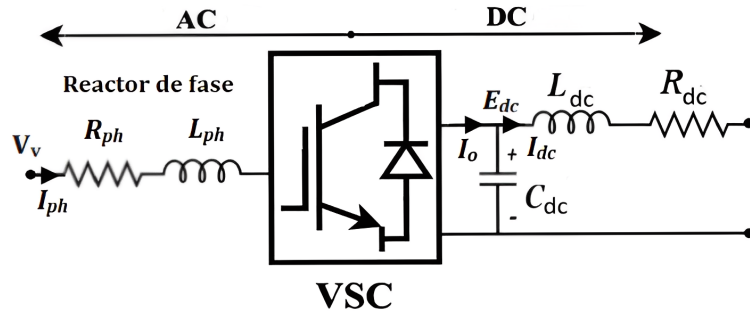


Figura 2.4: Representación esquemática de un VSC

Prestando atención a lo que se encuentra entre los nodos V_v y E_{dc} , se tiene un lado que opera en un régimen de corriente alterna (AC) y otro lado trabajando con variables de corriente directa (DC). Con esto en mente, el comportamiento dinámico del sistema de conversión para el lado de AC está dado en las expresiones:

$$C_{ac} \frac{d}{dt} V_v = I_{ac} - I_{ph} \quad (2.6a)$$

$$L_{ph} \frac{d}{dt} I_{ph} = V_v - R_{ph} I_{ph} \quad (2.6b)$$

En el lado de DC, la dinámica se rige de acuerdo a:

$$C_{dc} \frac{d}{dt} E_{dc} = I_o - I_{dc} \quad (2.7a)$$

$$L_{dc} \frac{d}{dt} I_{dc} = E_{dc} - R_{dc} I_{dc} \quad (2.7b)$$

Si bien se observa que existen relaciones lineales donde los efectos de conmutación están dados en la expresión (2.5), de acuerdo a lo que presenta [35], el modelado también permite hacer regulación de voltaje y potencia por medio de compensadores tipo PI.

2.3. Modelo del VSC en coordenadas dq

A pesar de los resultados que se han encontrado con el uso de métodos y modelos lineales, el diseño de controladores y el uso de modelos que capturen el comportamiento más cercano de los sistemas estudiados, es una tarea que ocupa a la comunidad de control. A continuación se presentan las consideraciones que permiten el uso de algunas herramientas útiles para el planteamiento del modelo del VSC que se va a utilizar en el desarrollo del esquema de control.

Se tiene la configuración de un convertidor trifásico de dos niveles, formado por estructuras *Half Bridge* o medio puente, basado en interruptores de potencia IGBT. Además, se considera que el sistema VSC-HVDC cumple con las siguientes condiciones:

- (C1) El sistema opera de manera balanceada en sus tres fases.
- (C2) Los convertidores VSC operan de manera sincronizada con la frecuencia de la red.
- (C3) Los convertidores VSC operan de manera ideal en los cuatro cuadrantes P-Q.

Los puntos C1 y C2 simplifican el modelado y control permitiendo la descripción de la dinámica trifásica en el marco de referencia $dq0$, donde la componente 0 es cero para todo tiempo, reduciendo el modelo de 3 componentes de AC a 2 componentes en DC. El punto C3 viene de la topología de la red HVDC basada en VSCs y no en otro tipo de convertidores y se satisface gracias a que los convertidores *autoconmutados* pueden controlar el ángulo de disparo y la magnitud de voltaje en DC, lo que permite la operación bidireccional de los VSCs [36].

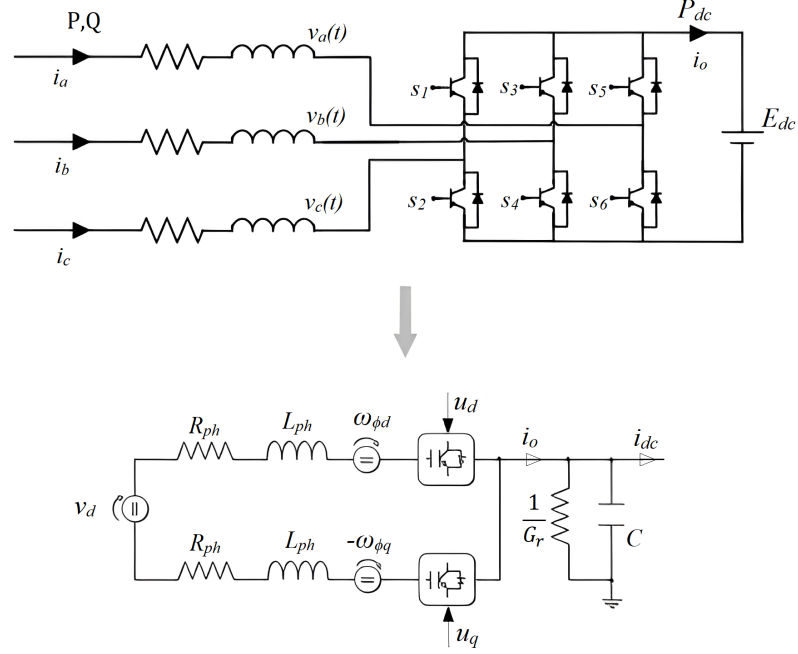


Figura 2.5: Circuito equivalente en el marco dq

A partir de una operación balanceada se puede llegar a la representación en el marco dq utilizando la transformación de Park de la forma:

$$F_{dq0}^s = K^s f_{abc} \quad (2.8)$$

donde

$$K^s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin \theta & \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

y se obtiene un circuito equivalente en el marco de referencia $dq0$ como el que se muestra en la Figura 2.5. Se puede entonces deducir la dinámica en el lado de AC de la siguiente manera [9]:

$$L_{ph} \dot{I}_d = -R_{ph} I_d + L_{ph} \omega I_q - d_d E_{dc} + V_d \quad (2.10a)$$

$$L_{ph} \dot{I}_q = -L_{ph} I_d \omega - R_{ph} I_q - d_q E_{dc} + V_q \quad (2.10b)$$

donde I_d e I_q representan la corriente directa y de cuadratura respectivamente, E_{dc} representa el voltaje de DC, d_d y d_q son los radios de trabajo directo y de cuadratura, respectivamente, V_d y V_q representan los voltajes de entrada directo y de cuadratura,

2. SISTEMAS VSC-HVDC

respectivamente. Por último, L_{ph} y R_{ph} representan la inductancia y resistencia del filtro de AC.

La dinámica del voltaje de DC queda representada entonces por el siguiente sistema dinámico escalar:

$$C\dot{E}_{dc} = -G_r E_{dc} + i_o - i_{dc}, \quad i_o = d_d I_d + d_q I_q \quad (2.11)$$

donde se asume que la corriente i_{dc} sale en dirección de la red de DC, i_o representa la inyección de corriente del VSC, C y G es el valor del capacitor de DC y la conductancia de conmutación, respectivamente. Para la inyección de potencias, se consideran las definiciones estándar de potencia instantánea activa y reactiva que para el lado de AC esta dada por:

$$P := V_d I_d + V_q I_q \quad Q := V_q I_d - V_d I_q \quad (2.12)$$

mientras que la potencia asociada al lado de DC queda dada como sigue:

$$P_{dc} := E_{dc} i_o \quad (2.13)$$

Si se asume que existe un mecanismo de lazo de enganche de fase o *Phase-Lock Loop* (PLL) que fija el ángulo de transformación al marco de referencia $dq0$ entonces el voltaje de cuadratura queda de la forma:

$$(A1) \quad V_q = V_q^* = 0 \quad \forall t \geq 0$$

Ahora, se tiene la corriente en estado estacionario de la forma $\dot{I}_d^* = 0$, $\dot{I}_q^* = 0$ tal que:

$$d_d^* = \frac{1}{E_{dc}} (-R_{ph} I_d^* + L_{ph} \omega I_q^* + V_d^*) \quad (2.14a)$$

$$d_q^* = \frac{1}{E_{dc}} (-R_{ph} I_q^* - L_{ph} \omega I_d^* + V_d^*) \quad (2.14b)$$

con I_d^* e I_q^* como las corrientes deseadas y V_d^* el voltaje directo correspondiente en el lado de AC. Si se sustituyen (2.14a) y (2.14b) en (2.11), se puede obtener la corriente deseada de inyección de VSC como:

$$i_o^* = \frac{V_d^* I_d^* - R_{ph} (I_d^*)^2 - R_{ph} (I_q^*)^2}{E_{dc}} = \frac{P^* - D^*}{E_{dc}} \quad (2.15)$$

donde

$$P^* = V_d^* I_d^*, \quad D^* = R_{ph} [(I_d^*)^2 + (I_q^*)^2] \quad (2.16)$$

representan, la potencia activa deseado en el lado de AC y la potencia disipada internamente por el convertidor, respectivamente. De acuerdo a lo mencionado acerca de la eficiencia de los convertidores con una frecuencia adecuada de conmutación y una resistencia muy pequeña, se puede asumir lo siguiente [37]:

$$(A2) \quad D^* = 0$$

Haciendo un cambio de notación para la entrada de control tal que $[d_d, d_q]^T = [u_d, u_q]^T$ y considerando (A1) y (A2) como condiciones validas de operación se tiene que la dinámica del sistema en variables de *co-energía* está dada por las ecuaciones (2.17a) - (2.17c).

$$\dot{x}_1 = \frac{R_{ph}}{L_{ph}}x_1 - \omega x_2 - \frac{1}{2L_{ph}}x_3u_d + \frac{v_d}{L_{ph}} \quad (2.17a)$$

$$\dot{x}_2 = \omega x_1 - \frac{R_{ph}}{L_{ph}}x_2 - \frac{1}{2L}x_3u_q \quad (2.17b)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{3}{4C}(x_1u_d + x_2u_q) - \frac{1}{C}i_{dc} \quad (2.17c)$$

Donde x_1 y x_2 son las corrientes i_d e i_q respectivamente, y x_3 es el voltaje de DC en el capacitor C .

2.4. Enlaces VSC-HVDC

En esta sección se retoma el análisis en estado estacionario de un modelo del convertidor VSC para el análisis de enlaces VSC-HVDC.

Las estaciones de conversión corresponden también al bloque principal en la formación de redes HVDC, cumpliendo la función de compensadores de potencia y de enlaces en conexión de redes independientes [38] como se muestra en la Figura 2.6, donde se presenta la configuración de algunas aplicaciones e interconexiones que se pueden integrar en un sistema de potencia convencional utilizando enlaces VSC-HVDC [39]. Se puede notar la integración de sistemas de generación convencional, la conexión de plantas de generación remotas, como las que se encuentran mar adentro (off-shore) y que utilizan diferentes métodos de generación, microrredes o redes de baja inercia y redes que operan a diferentes frecuencias, por mencionar los casos más usuales.

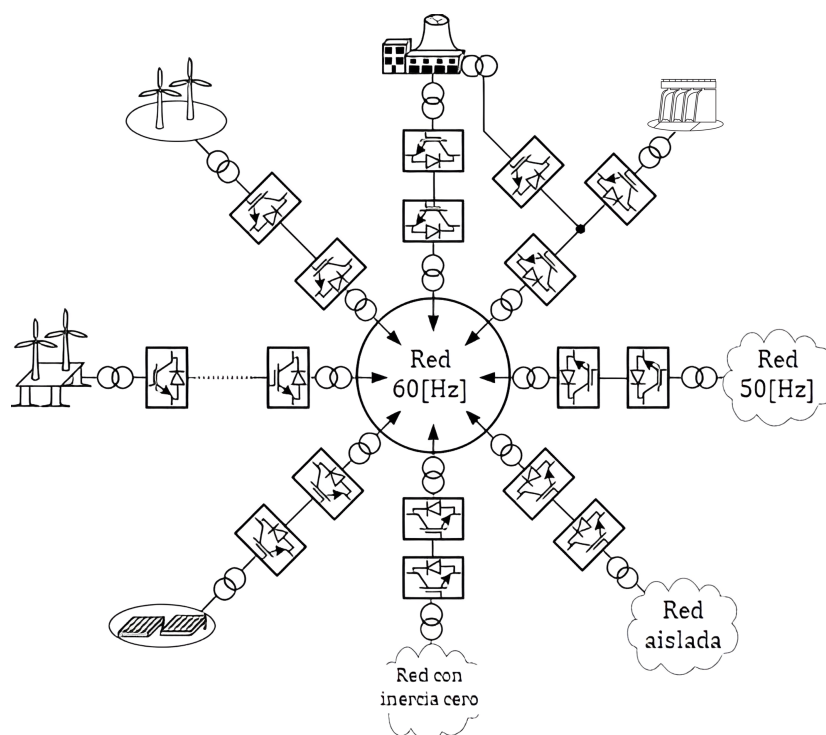


Figura 2.6: Conexión y aplicaciones de enlaces VSC-HVDC

Aunque los convertidores de potencia se utilizan en la construcción de sistemas flexibles de transmisión en corriente alterna (FACTS, por sus siglas en inglés), como el compensador estático síncrono (STATCOM) [40], son también bloques importantes en las diferentes topologías de enlaces VSC-HVDC. La clasificación de los enlaces de corriente directa de alto voltaje está dada en enlaces monopolares y bipolares, siendo los primeros un arreglo de dos estaciones de conversión VSC conectadas a través de un solo cable conductor y un retorno no necesariamente metálico, lo que permite reducir costos. Por otro lado, un enlace bipolar consta de una conexión mediante dos cables independientes y es una combinación de dos enlaces monopolares.

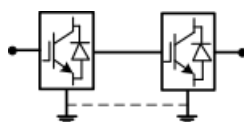


Figura 2.7: Enlace monopolar con retorno metálico

Dentro de los enlaces bipolares se pueden encontrar dos diferentes configuraciones. Una de ellas es la denominada *back-to-back*, este tipo de conexiones se localizan físicamente en el mismo sitio, simulando una conexión *espalda con espalda*, están diseñadas a voltajes entre 50 [KV] y 150 [KV]. Ambos convertidores realizan control de potencia de

DC y control de potencia reactiva, en cambio, la configuración *punto a punto* o *point-to-point* si cuenta con una conexión a través de un cable de transmisión en corriente directa como se observa en la Figura 2.8.

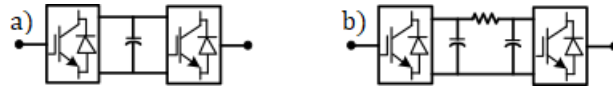
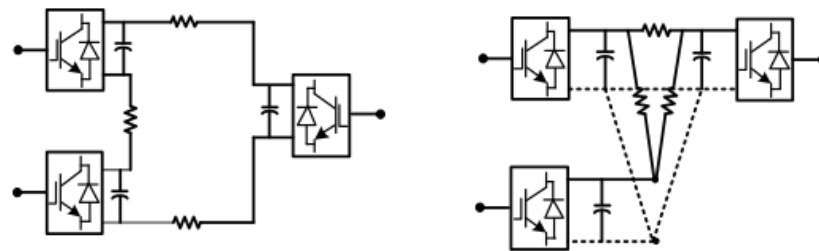


Figura 2.8: Enlace Bipolar: a) *Back-to-back* y b) *point-to-point*

Un sistema MT VSC-HVDC está formado por conexiones en serie o paralelo entre tres o más estaciones de conversión. En la Figura 2.9 se muestran estas configuraciones, que dan lugar a una red de corriente directa de alto voltaje y se caracterizan por contar con al menos un respaldo de voltaje en cada terminal de AC, control de voltaje en un convertidor inversor (VSI) y regulación de potencia en corriente directa en un convertidor rectificador (VSR).



(a) *Conexión en serie*

(b) *Conexión en paralelo*

Figura 2.9: Configuración de enlace de tres terminales

Dicho lo anterior, se tiene que los convertidores se pueden clasificar en tres tipos de acuerdo a su función y objetivos de control dentro del enlace: *i) Slack* (VSC_{Slack}) cuyo objetivo es la regulación de voltaje en DC, *ii) Scheduled-Power* (VSC_{Sch}) cumple la función de controlar el intercambio y transmisión de potencia, finalmente esta el *iii) Passive* (VSC_{pass}) que funciona como interfaz con redes de AC sin equipo de control de carga/frecuencia [34].

De acuerdo al análisis dinámico y en estado estacionario del VSC presentados previamente, es posible observar la forma en que el comportamiento dinámico de los sistemas conectados en el lado de corriente alterna afecta el desempeño de los arreglos multiterminal de DC y de manera contraria, la respuesta de la electrónica de potencia asociada a las estaciones de conversión VSC, también repercute en el comportamiento

del lado de AC y el desempeño general de la red [41].

Es por ello que para estudiar sistemas con interconexiones se utilizan herramientas de análisis como los flujos de potencia, que nos ayudan a calcular un punto de operación deseado en estado estacionario o un valor para inicializar al sistema. Algunos otros trabajos plantean el estudio de redes de transmisión HVDC a partir de la teoría de grafos, la cual permite construir modelos del tipo puerto Hamiltoniano (pH) [9]. Por otro lado, el comportamiento de la red puede ser representado a través de un conjunto de ecuaciones diferenciales algebraicas (DAE, por sus siglas en inglés), en donde se incluyen los estados dinámicos asociados a las unidades de generación, sistemas de transmisión y cargas, además de las variables estáticas (fasores de voltaje en los nodos) provenientes de las restricciones algebraicas de la red [42]. Siguiendo la línea de estudio de la dinámica de sistemas eléctricos que se presenta en [43, 44] se tienen las siguientes expresiones que describen de manera general el comportamiento dinámico de este tipo de sistemas:

$$\dot{\mathbf{x}}_d(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}_d, \mathbf{z}, \mathbf{u}) \quad (2.18a)$$

$$0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}_d, \mathbf{z}, \mathbf{u}) \quad (2.18b)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}_d, \mathbf{z}) \quad (2.18c)$$

los estados dinámicos son $\mathbf{x}_d \in \mathbb{R}^{n_d}$, $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^{n_z}$ es el conjunto de variables algebraicas correspondientes a la magnitud del voltaje y el ángulo de fase de cada nodo de AC y únicamente la magnitud del voltaje en DC, $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^{n_d}$ representa las funciones diferenciales no lineales que describen el comportamiento dinámico de las estaciones de conversión VSC, unidades de generación y cargas, $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^{n_z}$ representa las restricciones algebraicas de la red (balance de potencias), $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^p$ contiene a las entradas del sistema y $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^m$ representa a las salidas del sistema, las cuales pueden ser propiamente el estado del sistema o alguna función del mismo.

Diseño de un control difuso para redes VSC-HVDC

Este capítulo contiene el desarrollo de un controlador basado en técnicas no lineales de control difuso, que es utilizado para la regulación de potencia en los diferentes convertidores que se utilizan en las redes VSC-HVDC.

En las secciones anteriores se ha presentado el estudio de redes HVDC y de sus componentes, donde se destacan características no lineales de los sistemas de conversión de potencia. Si bien se sabe que en su mayoría los procesos físicos son no lineales, hay una tendencia a diseñar controladores lineales, lo cual es una tarea más sencilla. Sin embargo, solo permite asegurar la operación de un controlador para condiciones de operación en un punto de equilibrio y no en una región de operación menos restrictiva.

Existen técnicas como *gain scheduling* o ganancias programadas donde se determinan ganancias apropiadas para ciertas condiciones y se utiliza un mecanismo de búsqueda para seleccionar la ganancia adecuada para cada instante. A pesar de que la técnica funciona bien con muchos sistemas, existen problemas de interpolación y resulta poco práctica en sistemas grandes. Algunas otras técnicas consiguen mejores resultados en problemas bien definidos usando herramientas de autosintonización, sin embargo, encuentran limitaciones cuando se trabaja con sistemas de mayor dimensión y altamente no lineales [45].

Por otro lado, los métodos basados en técnicas de control inteligente se han propuesto para cierto tipo de sistemas. Dentro del término *Control Inteligente* se tiene que aquellas técnicas que se pueden llevarse a cabo basados en la inteligencia de un ser humano experto en control, por ser el caso, se encuentran dentro de este enfoque. Sin embargo, en la definición anterior no se toma en cuenta la capacidad sensorial, de actuación y de procesamiento humana. De manera más puntual, se tiene que el control inteligente es aquel que es capaz de realizar abstracciones de la información disponible,

que tiene la capacidad de toma de decisiones basadas en experiencia o conocimiento, además de poder lidiar con condiciones anormales o falta de información de la planta y su entorno, a través de procesos similares a los de la inteligencia humana. Existen numerosas técnicas de inteligencia artificial como el control experto, lógica difusa, redes neuronales y algoritmos de búsqueda inteligente, entre otros [46]. Los cuales demandan una cantidad importante de recursos computacionales, así como procesamiento de grandes cantidades de datos o en su defecto, un conocimiento experto del sistema.

Para probar la viabilidad de la aplicación de controladores inteligentes en la regulación de potencia de sistemas VSC-HVDC, en este capítulo se utiliza una red de tres terminales para la cual se comenzara describiendo su estructura y topología, las consideraciones y herramientas que se utilizarán para el análisis y solución en estado estacionario, así como la integración de esquemas de control para cada uno de los sistemas de conversión de potencia que integran la red.

3.1. Enlace VSC-HVDC de tres terminales

Una vez estudiado el modelo de los convertidores VSC en el marco de referencia dq y conocer el comportamiento dinámico bajo las consideraciones descritas en la sección anterior, se plantea el análisis de una red MT que integra el modelo no lineal del VSC, con el fin de diseñar un controlador capaz de conducir al sistema VSC-HVDC a un punto de operación.

En la Figura 3.1 se presenta la configuración de un enlace MT compuesto por tres enlaces VSC. Se puede observar que dos de los tres convertidores están conectados a enlaces de corriente alterna con generación síncrona, mientras que el tercero esta conectado a una red pasiva de AC con demanda de potencia activa y reactiva.

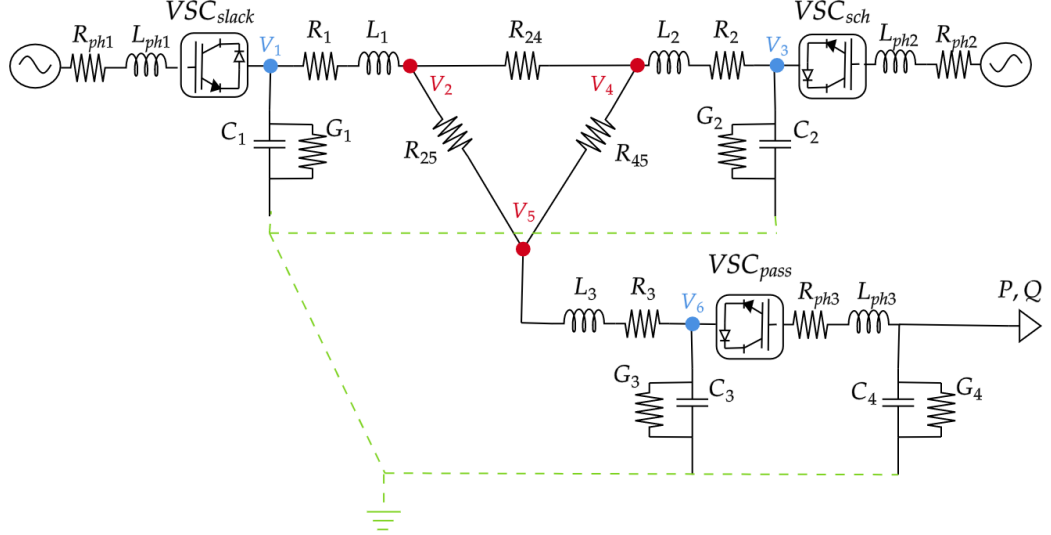


Figura 3.1: Enlace VSC-HVDC de Tres Terminales

El enlace mostrado en la Figura 3.1, permite estudiar los tres tipos de convertidores que, de acuerdo con lo que se menciona en [38], se clasifican de acuerdo a la función que desempeñan dentro de la red. En este caso, se considera al VSC 1 como el VSC_{slack} o *compensador*, cuyo objetivo es mantener la referencia de voltaje para la red además de satisfacer o compensar la demanda de potencia de las cargas conectas a los demás nodos. El convertidor VSC 2 se considera como un VSC_{sch} o de *Potencia Programada*, cuya función es la inyección de una potencia dada. Finalmente, el convertidor VSC 3 es un convertidor del tipo VSC_{pass} , que se encarga de conectar la red de DC con una red de AC que no tiene generación.

Para el MT VSC-HVDC de la Figura 3.1 se tienen las siguientes vaeibales dinámicas y algebraicas:

$$\mathbf{x}_d = \begin{bmatrix} i_d^{slack} \\ i_q^{slack} \\ E_{dc}^{slack} \\ i_d^{sch} \\ i_q^{sch} \\ E_{dc}^{sch} \\ i_d^{pass} \\ i_q^{pass} \\ E_{dc}^{pass} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \\ z_6 \end{bmatrix}$$

Considerando la subred de corriente directa formada por el enlace Multiterminal VSC-HVDC de la Figura 3.1, la inyección de corriente está dada por la siguiente ex-

presión:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{12} & -Y_{13} & -Y_{14} & -Y_{15} & -Y_{16} \\ -Y_{21} & Y_{22} & -Y_{23} & -Y_{24} & -Y_{25} & -Y_{26} \\ -Y_{31} & -Y_{32} & Y_{33} & -Y_{34} & -Y_{35} & -Y_{36} \\ -Y_{41} & -Y_{42} & -Y_{43} & Y_{44} & -Y_{45} & -Y_{46} \\ -Y_{51} & -Y_{52} & -Y_{53} & -Y_{54} & Y_{55} & -Y_{56} \\ -Y_{61} & -Y_{62} & -Y_{63} & -Y_{64} & -Y_{65} & Y_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

donde la relación entre voltajes y corrientes en los nodos (v_1-v_6) esta dada por la matriz de admitancias denotada como Y_{BUS} que está formada por los valores de las admitancias de las líneas de transmisión que interconectan a cada uno de los nodos, es decir, es una matriz de interconexiones, que en el presente caso de estudio tiene los siguientes valores retomados de [38]:

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} 2000 & -2000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2000 & 2143.9 & 0 & -95.9233 & -47.9616 & 0 \\ 0 & 0 & 2000 & -2000 & 0 & 0 \\ 0 & -95.9233 & -2000 & 2167.9 & -71.9424 & 0 \\ 0 & -47.9616 & 0 & -71.9424 & 2119.9 & -2000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2000 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

En unidades [pu] referenciadas a una potencia base $P_{base} = 100[MVA]$ y un voltaje nominal de $\pm 100[KV]$.

3.1.1. Condiciones iniciales

Para conocer el punto de operación deseado en estado estacionario de la red es necesario resolver utilizando flujos de potencia. Para facilitar el procedimiento, utilizamos la reducción de Kron, que se puede encontrar a detalle en el Apéndice (A), de esta manera se obtiene una configuración equivalente de la red como se muestra en la Figura 3.2, con una matriz de admitancias equivalente Y_{BUS}^r

$$Y_{BUS}^r = \begin{bmatrix} 129.4471 & -84.2672 & -45.1799 \\ -84.2672 & 148.9907 & -64.7236 \\ -45.1799 & -64.7236 & 109.9035 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Para la red de HVDC formada por los nodos (v_1, v_3, v_6) se tiene una potencia base $P_{Base} = 100 [MVA]$, la magnitud del voltaje en el nodo slack tiene un valor $v_1 = 1 [pu]$. Para el punto de operación de la red se plantea el problema de flujos de potencia con las consideraciones dadas en la Tabla 3.1.

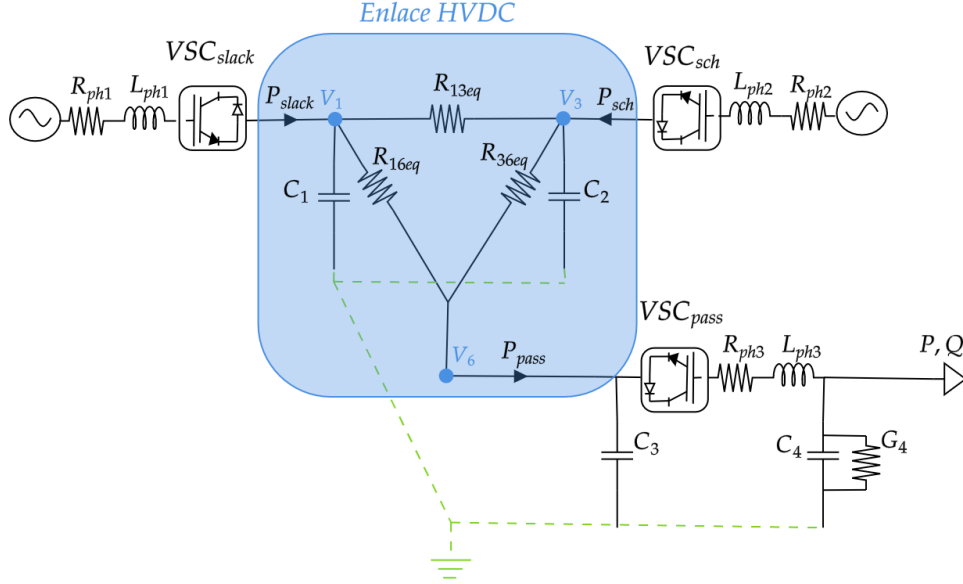


Figura 3.2: Enlace VSC-HVDC de Tres Terminales reducida

Nodo	Variables Conocidas [pu]	Variables desconocidas
VSC_{slack}	$v_1 = 1$	P_{slack}^g
VSC_{sch}	$P_{sch}^g = 1$	v_3
VSC_{pass}	$P_{pass}^d = 1.5$	v_6

Tabla 3.1: Variables de la red equivalente del enlace HVDC

Se emplean las ecuaciones de balance de potencia de los nodos v_3 y v_6 que están dadas de la siguiente forma:

$$\Delta P_3 = P_3^g - 0 - P_3^{cal} \quad (3.4a)$$

$$\Delta P_6 = 0 - P_6^d - P_6^{cal} \quad (3.4b)$$

donde la potencia calculada para los nodos VSC_{sch} y VSC_{pass} está dada por:

$$P_{sch}^{cal} = v_3^2 Y_{33} + v_3 v_1 Y_{13} + v_3 v_6 Y_{36} \quad (3.5a)$$

$$P_{pass}^{cal} = v_6^2 Y_{66} + v_6 v_1 Y_{61} + v_6 v_3 Y_{63} \quad (3.5b)$$

y la matriz jacobiana es expresada como:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_3}{\partial v_3} & \frac{\partial P_3}{\partial v_6} \\ \frac{\partial P_6}{\partial v_3} & \frac{\partial P_6}{\partial v_6} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Siguiendo el procedimiento planteado en el Apéndice (B) para la solución de flujos de potencia con la matriz de admitancias equivalente de la red reducida Y_{BUS}^r , se obtienen los siguientes valores de operación de la red en estado estacionario:

$$VSC_{Slack} \begin{cases} V_1 = 1 \text{ [p.u.]} \\ P_{dc1} = 0.5211 \text{ [p.u.]} \\ I_{dc1} = 0.5211 \text{ [p.u.]} \end{cases} \quad VSC_{sch} \begin{cases} V_3 = 1.0009 \text{ [p.u.]} \\ P_{dc3} = 1 \text{ [p.u.]} \\ I_{dc3} = 0.9991 \text{ [p.u.]} \end{cases}$$

$$VSC_{pass} \begin{cases} V_6 = 0.9867 \text{ [p.u.]} \\ P_{dc6} = -1.5 \text{ [p.u.]} \\ I_{dc6} = -1.5202 \text{ [p.u.]} \end{cases}$$

3.2. Control difuso Takagi-Sugeno

El control difuso esta basado en lógica difusa, que tiene una estructura muy cercana al pensamiento y lenguaje humano. Las características de los sistemas difusos, les dan la capacidad de desempeñar operaciones más complejas, comparadas con un mapeo lineal y llegan a ser conocidos como aproximadores universales, al capturar de manera cercana, la naturaleza del mundo real, de tal forma que permite convertir una estrategia de control lingüística o *platicada* y basada en conocimiento experto en una estrategia de control automático [47].

En la Figura 3.3 se encuentra una representación de un controlador difuso, el cual vamos a denotar como *FC* por sus siglas en inglés. Se pueden observar los diferentes componentes y la manera en que estos desempeñan una función y se comparten información.

Un modelo difuso Takagi-Sugeno (T-S) es una representación de cierta clase de sistemas no lineales, a través de reglas difusas *IF-THEN* que representan relaciones entrada-salida lineales y locales de un sistema no lineal y que ha sido aplicada de manera exitosa en el diseño de control. Se plantea que un modelo no lineal puede ser representado como la interpolación de conjunto de modelos lineales por medio de funciones de membresía. Las funciones de membresía son las encargadas de describir el grado de pertenencia de una variable a un valor del modelo difuso previamente definido y mapea al sistema en algún valor del conjunto $[0, 1]$. Por lo tanto, es posible diseñar un controlador difuso y presentar un análisis de estabilidad con la solución de un problema de desigualdades matriciales o LMIs, por sus siglas en inglés [48, 49].

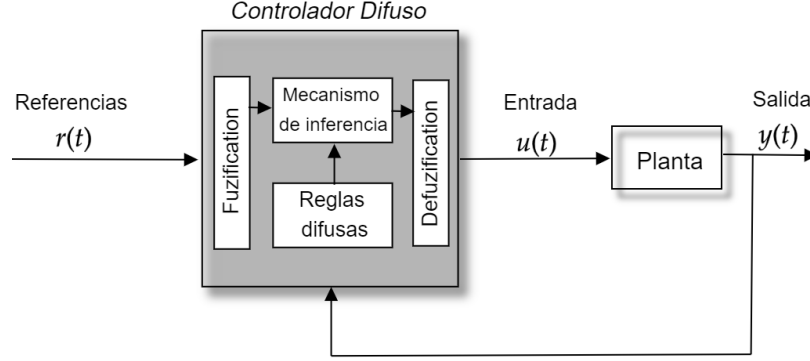


Figura 3.3: Controlador difuso

La principal característica del modelo difuso es que expresa la dinámica local de cada implicación o regla difusa a través de un modelo lineal del sistema. A diferencia del modelo difuso estándar o tradicional, el modelo difuso T-S tiene como variable de salida una función, por ello recibe también el nombre de *sistema difuso funcional* [49].

3.2.1. Diseño de un controlador basado en LMI de un modelo difuso T-S

Para un sistema no lineal continuo en el tiempo con m entradas y n estados, un modelo difuso del tipo T-S puede ser descrito de acuerdo a las siguientes reglas:

Regla i del modelo:

IF $z_1(t)$ is M_{i1} and... and $z_p(t)$ is M_{ip} ,

$$\mathbf{THEN} \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, r$$

donde $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ es el vector de estado, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de entradas, $y(t) \in \mathbb{R}^q$ es el vector de salidas, $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$, y $C_i \in \mathbb{R}^{q \times n}$; M_{ij} es el conjunto difuso, r es el número de reglas del modelo y $z_1(t), \dots, z_p(t)$ son las variables auxiliares o variables premisa.

Dado un par $(x(t), u(t))$ las salidas del sistema difuso continuo estarán dadas como sigue:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) [A_i x(t) + B_i u(t)]}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} & y(t) &= \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) C_i x(t)}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \\ &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [A_i x(t) + B_i u(t)], & &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i x(t) \end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned} w_i(z(t)) &= \prod_{j=1}^p M_{ij}(z_j(t)), & h_i(z(t)) &= \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \\ z(t) &= [z_1(t), z_2(t), \dots, z_p(t)] \end{aligned}$$

Para cada regla difusa, se pueden diseñar r tipos de reglas de control difuso a través del método de retroalimentación de estado tal que la entrada de control queda expresada como:

$$u_i(t) = K_i x(t) \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (3.7)$$

Aplicando el método de compensación paralela distribuida (PDC, por sus siglas en inglés), que es un método de diseño de controladores difusos basado en el modelo, el control general o total estará dado por:

$$u(t) = \frac{\sum_{j=1}^r w_j K_j x(t)}{\sum_{j=1}^r w_j} \quad (3.8)$$

Entonces el análisis de estabilidad está basado en el teorema reportado en [50].

Teorema 1 *El punto de equilibrio del sistema difuso es asintóticamente estable si existe una matriz común Q positiva definida que satisface las siguientes condiciones:*

$$0 > Q A_i^T + A_i Q + V_i^T B_i^T + B_i V_i, \quad i = 1, \dots, r \quad (3.9a)$$

$$0 > Q A_i^T + A_i Q + Q A_j^T + A_j Q + V_j^T B_i^T + B_i V_j + V_i^T B_j^T + B_j V_i, \quad i < j \leq r \quad (3.9b)$$

$$Q = P^{-1} > 0 \quad (3.9c)$$

donde $V_i = K_i Q$, despejando la ganancia K_i entonces se tiene $K_i = V_i Q^{-1} = V_i P$, $V_j = K_j Q$ acomodando es $K_j = V_j Q^{-1} = V_j P$

3.3. Diseño de un controlador difuso T-S para convertidores VSC

Dado el modelo del VSC en coordenadas dq descrito en las ecuaciones (2.17a)-(2.17c), se proponen tres reglas difusas.

Regla 1):

$$\mathbf{IF} \ i_{dc}^* = i_{dc},$$

$$\mathbf{THEN} \ \left\{ \dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 u(t) \right.$$

Regla 2):

$$\mathbf{IF} \ i_{dc}^* > i_{dc},$$

$$\mathbf{THEN} \ \left\{ \dot{x}(t) = A_2 x(t) + B_2 u(t) \right.$$

Regla 3):

$$\mathbf{IF} \ i_{dc}^* < i_{dc},$$

$$\mathbf{THEN} \ \left\{ \dot{x}(t) = A_3 x(t) + B_3 u(t) \right.$$

Si utilizamos la linealización de Taylor para el modelo dq se tiene que:

$$\dot{x} = A_i x + B_i u \tag{3.10}$$

donde

$$A_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} \Big|_{(x,u)=(x_i^*,u_i^*)} \quad B_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_d} & \frac{\partial f_1}{\partial u_q} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_d} & \frac{\partial f_2}{\partial u_q} \\ \frac{\partial f_3}{\partial u_d} & \frac{\partial f_3}{\partial u_q} \end{bmatrix} \Big|_{(x,u)=(x_i^*,u_i^*)}$$

tal que para $i = 1, 2, 3$ se tiene:

$$A_i = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\omega & -\frac{1}{2L}u_d \\ \omega & -\frac{R}{L} & -\frac{1}{2L}u_q \\ \frac{3}{4C}u_d & \frac{3}{4C}u_q & 0 \end{bmatrix}_{|(x,u)=(x_i^*,u_i^*)} \quad B_i = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2L}x_3 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2L}x_3 \\ \frac{3}{4C}x_1 & \frac{3}{4C}x_2 \end{bmatrix}_{|(x,u)=(x_i^*,u_i^*)}$$

3.3.1. Diseño de un controlador difuso para un convertidor VSC_{slack}

El objetivo de un convertidor VSC_{slack} es regular el nivel de voltaje en sus terminales y compensar la potencia demandada para cumplir con el punto de operación deseado de la red, de tal forma que pueda asegurar un funcionamiento dentro de los límites permitidos en el enlace de corriente directa. Para cubrir este objetivo, se plantea un controlador difuso por retroalimentación de estados utilizando el modelo difuso de tres reglas. Si el voltaje deseado en las terminales es $E_{dc} = 1$ [p.u.] y con $v_d = 2.3$ [p.u.] y se conoce que la corriente demandada es $i_L = 0.5211$ [p.u.] entonces el estado y entrada deseados tendrán los siguientes valores:

$$x^* = \begin{bmatrix} 0.1511 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad u^* = \begin{bmatrix} 4.5998 \\ 0.0227 \end{bmatrix}$$

Se tienen los siguientes sistemas lineales para las reglas difusas de la forma:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -3.7699 & -376.9911 & -11550 \\ 376.9911 & -3.7699 & -56.9449 \\ 61.6041 & 0.3033 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} -2513 & 0 \\ 0 & -2513 \\ 2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -3.7699 & -376.9911 & -11560 \\ 376.9911 & -3.7699 & -85.4194 \\ 61.6026 & 0.4552 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} -2513.3 & 0 \\ 0 & -2513.3 \\ 3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} -3.7699 & -376.9911 & -11560 \\ 376.9911 & -3.7699 & -56.9449 \\ 61.6041 & 0.3035 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_3 = \begin{bmatrix} -2513.3 & 0 \\ 0 & -2513.3 \\ 2 & 0 \end{bmatrix}$$

A partir de lo que se menciona en la Sección 3.2, las funciones de membresía son las encargadas de mapear las variables del modelo difuso a un valor que representa el grado de pertenencia. Las funciones de membresía suelen especificarse de manera heurística a partir de la experiencia y la intuición. Para este caso, se realizaron pruebas con funciones de tipo triangular, trapezoidal y gaussina como se muestran en la Figura 3.4, siendo éstas las que proporcionaron una mejor respuesta.

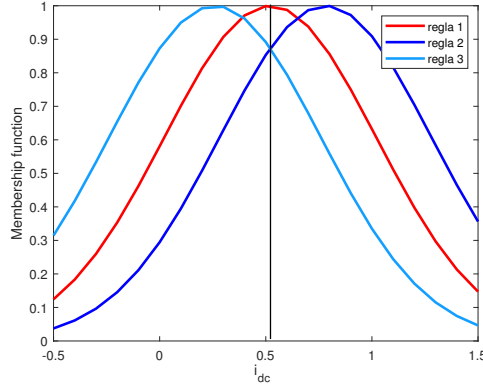


Figura 3.4: Funciones de membresía para el VSC_{slack} .

El conjunto de desigualdades matriciales a resolver esta dado como sigue:

$$0 > QA_1^T + A_1Q + V_1^T B_1^T + B_1V_1 \quad (3.11a)$$

$$0 > QA_2^T + A_2Q + V_2^T B_2^T + B_2V_2 \quad (3.11b)$$

$$0 > QA_3^T + A_3Q + V_3^T B_3^T + B_3V_3 \quad (3.11c)$$

$$0 > QA_1^T + A_1Q + QA_2^T + A_2Q + V_2^T B_1^T + B_1V_2 + V_1^T B_2^T + B_2V_1 \quad (3.11d)$$

$$0 > QA_1^T + A_1Q + QA_3^T + A_3Q + V_3^T B_1^T + B_1V_3 + V_1^T B_3^T + B_3V_1 \quad (3.11e)$$

$$Q = P^{-1} > 0 \quad (3.11f)$$

Para la solución de las desigualdades anteriores se utiliza Matlab y la librería *Yalmip*

[51] obteniendo la siguiente solución para una común $Q > 0$.

$$Q = \begin{bmatrix} 2 \times 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 2 \times 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 2 \times 10^{-6} \end{bmatrix}$$

entonces, las ganancias de retroalimentación se obtienen a partir de $K = VP$ con $P = Q^{-1}$:

$$K_1 = \begin{bmatrix} -6950.03 & 0.0 & 12.4528 \\ 0.0 & -6950.03 & 0.0225 \end{bmatrix} \quad K_2 = \begin{bmatrix} -9836 & 0.0 & 13.2688 \\ 0.0 & -9836 & 0.0338 \end{bmatrix}$$

$$K_3 = \begin{bmatrix} -9858 & 0.0 & 11.7240 \\ 0.0 & -9858 & 0.0225 \end{bmatrix}$$

De acuerdo a la ecuación (3.8) la entrada de control total es:

$$u(t) = (w_1(i_{dc})K_1 + w_2(i_{dc})K_2 + w_3(i_{dc})K_3)x(t)$$

donde $w_1 + w_2 + w_3 = 1$.

En las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7 se muestran los resultados de simulación con las ganancias obtenidas en la solución anterior para el modelo difuso de tres reglas. Es importante mencionar que dentro de la simulación se contemplan escenarios con variación en la referencia del voltaje a la salida del convertidor x_3^* y se fija la potencia deseada en $P_{dc}^* = 1$ [p.u.].

3.3 Diseño de un controlador difuso T-S para convertidores VSC

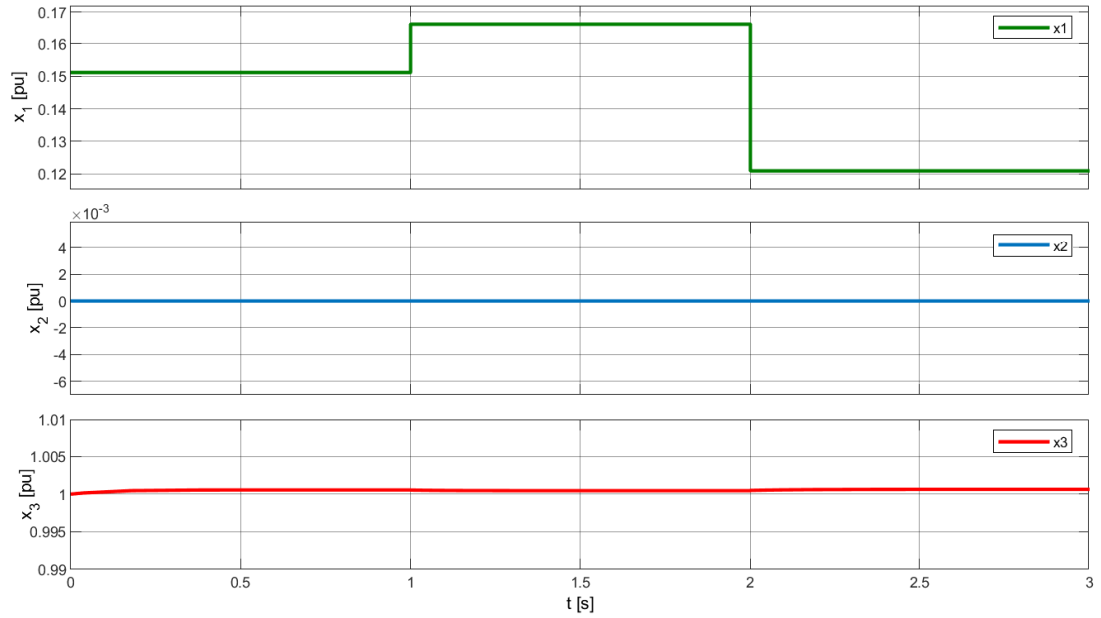


Figura 3.5: Respuesta del VSC_{slack} .

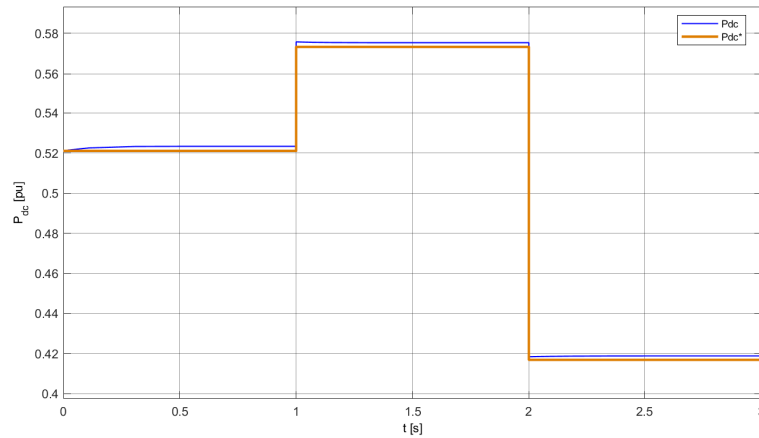


Figura 3.6: Potencia en las terminales del VSC_{slack} .

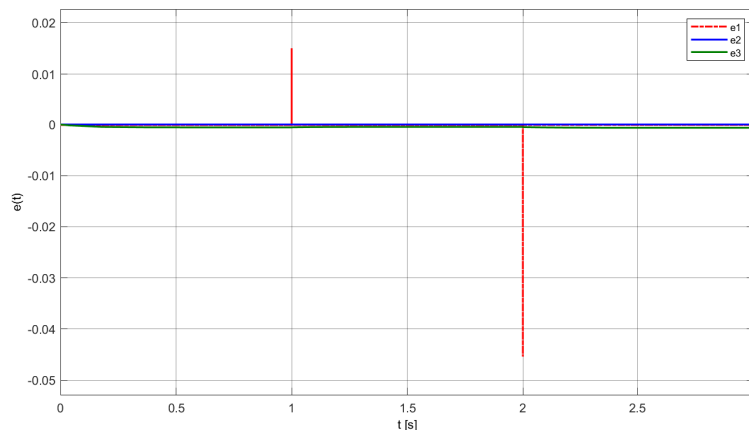


Figura 3.7: Error de regulación

3.3.2. Diseño de un controlador difuso para un convertidor VSC_{sch}

El objetivo de un convertidor VSC_{sch} es regular el intercambio de potencia en sus terminales, de tal forma que pueda asegurar una inyección constante de potencia hacia el enlace de corriente directa. Para cubrir este objetivo, se plantea un controlador difuso por retroalimentación de estados utilizando el modelo difuso de tres reglas. Si la potencia deseada a la salida es $P_{sch} = 1$ [p.u.] con $v_d = 2.3$ [p.u.] entonces el estado y entrada deseados tendrán los siguientes valores:

$$x^* = \begin{bmatrix} 0.2899 \\ 0 \\ 1.0009 \end{bmatrix} \quad u^* = \begin{bmatrix} 4.5954 \\ 0.0434 \end{bmatrix}$$

Se tienen los siguientes sistemas lineales para las reglas difusas:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -3.7699 & -376.9911 & -11550 \\ 376.9911 & -3.7699 & -109.1848 \\ 61.5459 & 0.5818 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} -2515.5 & 0 \\ 0 & -2515.5 \\ 3.88724 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -3.7699 & -376.9911 & -11549 \\ 376.9911 & -3.7699 & -163.7849 \\ 61.543 & 0.8728 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} -2515.5 & 0 \\ 0 & -2515.5 \\ 5.8238 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} -3.7699 & -376.9911 & -11550 \\ 376.9911 & -3.7699 & -54.5898 \\ 61.5488 & 0.2909 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_3 = \begin{bmatrix} -2515.5 & 0 \\ 0 & -2515.5 \\ 1.9411 & 0 \end{bmatrix}$$

Al igual que el convertidor VSC_{slack} , se probaron funciones de membresía triangulares, trapezoidales y gaussianas y se obtuvo una mejor respuesta con las funciones presentadas en la Figura 3.8.

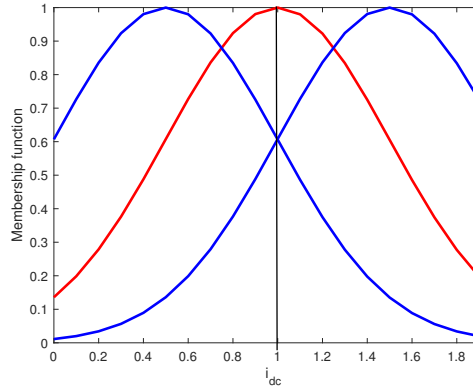


Figura 3.8: Funciones de membresía para el VSC_{sch} .

El conjunto de desigualdades matriciales a resolver esta dado por:

$$0 > QA_1^T + A_1Q + V_1^T B_1^T + B_1V_1 \quad (3.12a)$$

$$0 > QA_2^T + A_2Q + V_2^T B_2^T + B_2V_2 \quad (3.12b)$$

$$0 > QA_3^T + A_3Q + V_3^T B_3^T + B_3V_3 \quad (3.12c)$$

$$0 > QA_1^T + A_1Q + QA_2^T + A_2Q + V_2^T B_1^T + B_1V_2 + V_1^T B_2^T + B_2V_1 \quad (3.12d)$$

$$0 > QA_1^T + A_1Q + QA_3^T + A_3Q + V_3^T B_1^T + B_1V_3 + V_1^T B_3^T + B_3V_1 \quad (3.12e)$$

$$Q = P^{-1} > 0 \quad (3.12f)$$

3. DISEÑO DE UN CONTROL DIFUSO PARA REDES VSC-HVDC

Después de programar las desigualdades anteriores en Matlab y utilizando la herramienta *Yalmip* se tiene que existe una matriz $Q > 0$ común dada como sigue:

$$Q = \begin{bmatrix} 0.4 \times 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 \times 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 \times 10^{-6} \end{bmatrix}$$

las ganancias de retroalimentación son obtenidas a partir de $K = VP$ con $P = Q^{-1}$:

$$K_1 = \begin{bmatrix} -22059 & 0.0026 & 34.3271 \\ -0.0026 & -37254 & 0.0432 \end{bmatrix} \quad K_2 = \begin{bmatrix} -41951 & 0.0026 & 86.0792 \\ -0.0026 & -46968 & 0.0648 \end{bmatrix}$$
$$K_3 = \begin{bmatrix} -36462 & 0.0026 & 43.6387 \\ -0.0026 & -46968 & 0.0216 \end{bmatrix}$$

De acuerdo a la ecuación (3.8) la entrada de control total tendrá la siguiente forma:

$$u(t) = (w_1(i_{dc})K_1 + w_2(i_{dc})K_2 + w_3(i_{dc})K_3)x(t)$$

donde $w_1 + w_2 + w_3 = 1$.

En las Figuras 3.9-3.11 se muestran los resultados de simulación con las ganancias obtenidas en la solución anterior para el modelo difuso de tres reglas. Es importante mencionar, que dentro de la simulación se contemplan escenarios con variación en la referencia del voltaje a la salida del convertidor x_3^* y se fija la potencia deseada en $P_{dc}^* = 1$ [p.u.].

3.3 Diseño de un controlador difuso T-S para convertidores VSC

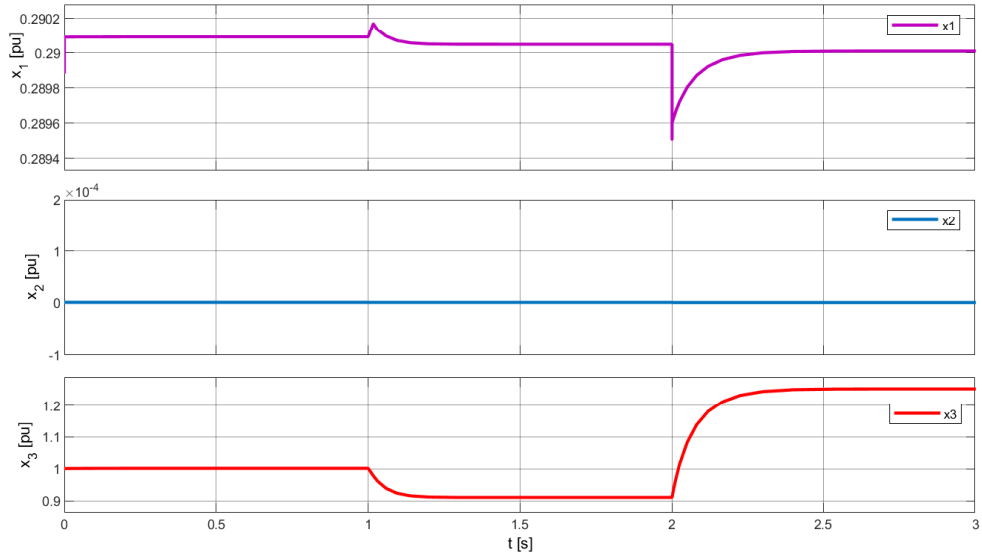


Figura 3.9: Respuesta del VSC_{sch} .

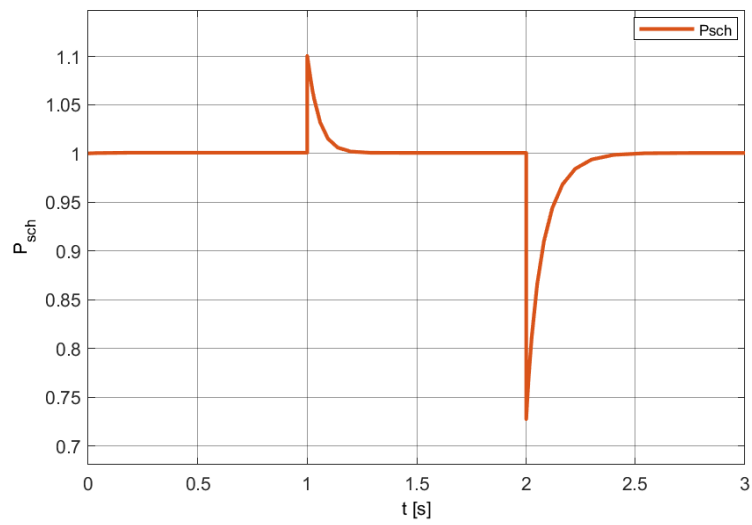


Figura 3.10: Potencia en las terminales del VSC_{sch} .

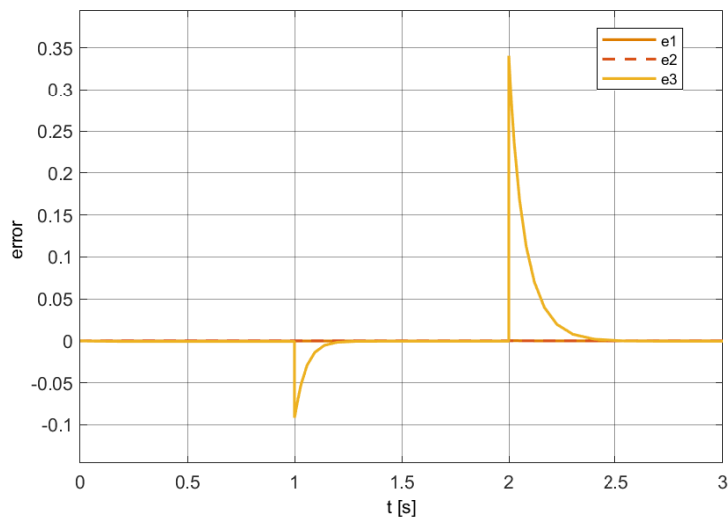


Figura 3.11: Error de regulación de Potencia P_{dc}

3.4. Simulación de una red MT VSC-HVDC de tres terminales con control difuso T-S

Los resultados de simulación del enlace multiterminal y la implementación de los controladores se obtuvieron a partir de la programación de la red en Matlab-Simulink. Para la solución de las desigualdades matriciales lineales se utilizó la herramienta *Yalmip* dentro del entorno de Matlab. Se puede consultar el código de la solución en el Apéndice (C).

Para la simulación de la red completa se utilizaron los valores que se encuentran en la matriz de admitancias Y_{BUS}^3 y los parámetros de la Tabla 3.2.

$$Y_{BUS}^3 = \begin{bmatrix} 14.1511 & -9.3978 & -4.7532 \\ -9.3978 & 16.4734 & -7.0755 \\ -4.7532 & -7.0755 & 11.8288 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Se inicializa el sistema en el siguiente punto de operación, previamente calculado por el método de flujos de potencia descrito en el Apéndice (B).

Parámetro/Variable	valor
v_d	2.3 [p.u.]
ω	$2\pi 60$ [rad/s]
L_s	$75e^{-3}/\omega$ [p.u.]
C	$56e^{-3}$ [p.u.]

Tabla 3.2: Parámetros de la red

$$\begin{aligned}
 VSC_{Slack} & \begin{cases} V_1 = 1 \text{ [p.u.]} \\ P_{dc1} = 0.763 \text{ [p.u.]} \\ I_{dc1} = 0.763 \times [p.u.] \end{cases} & VSC_{sch} & \begin{cases} V_3 = 0.9956 \text{ [p.u.]} \\ P_{dc3} = 1 \text{ [p.u.]} \\ I_{dc3} = 1.0044 \text{ [p.u.]} \end{cases} \\
 & & VSC_{pass} & \begin{cases} V_6 = 0.8586 \text{ [p.u.]} \\ P_{dc6} = -1.5 \text{ [p.u.]} \\ I_{dc6} = -1.7674 \text{ [p.u.]} \end{cases}
 \end{aligned}$$

En el caso de los controladores difusos, las ganancias de retroalimentación obtenida en la solución de las desigualdades matriciales correspondientes tienen los siguientes valores para el VSC_{slack} :

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \begin{bmatrix} -6950 & 0 & 12.4528 \\ 0 & -6954 & 0.0225 \end{bmatrix} & K_2 &= \begin{bmatrix} -9836 & 0 & 13.2688 \\ 0 & -9850 & 0.0338 \end{bmatrix} \\
 K_3 &= \begin{bmatrix} -9858 & 0 & 1.72 \\ 0 & -9850 & 0.0225 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

y las siguientes ganancias para el VSC_{sch}

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \begin{bmatrix} -22231 & 0.0047 & 34.772 \\ -0.0047 & -37254 & 0.0436 \end{bmatrix} & K_2 &= \begin{bmatrix} -42027 & 0.0047 & 86.712 \\ 0.0047 & -46759 & 0.0654 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

3. DISEÑO DE UN CONTROL DIFUSO PARA REDES VSC-HVDC

$$K_3 = \begin{bmatrix} -36453 & 0.0048 & 43.844 \\ -0.0048 & -46759 & 0.0218 \end{bmatrix}$$

Por otro lado, el control utilizado en el convertidor VSC_{pass} es el control propuesto en [17] con las siguientes ganancias:

$$K_i = 10 \qquad K_p = 1.1 \frac{K_i}{2.27}$$

y las ganancias del lazo interno que controla la corriente son:

$$K_{10} = 3000 \qquad K_{20} = 6000$$

Se realiza una simulación para observar el comportamiento de las variables de la red y de los estados de cada uno de los convertidores durante 20 [s]. Con los parámetros de la red dados en la matriz de admitancias Y_{BUS}^3 y en la Tabla 3.2 y utilizando las ganancias mencionadas para los controladores, el comportamiento de la red se muestra en las siguientes Figuras 3.12 y 3.13.

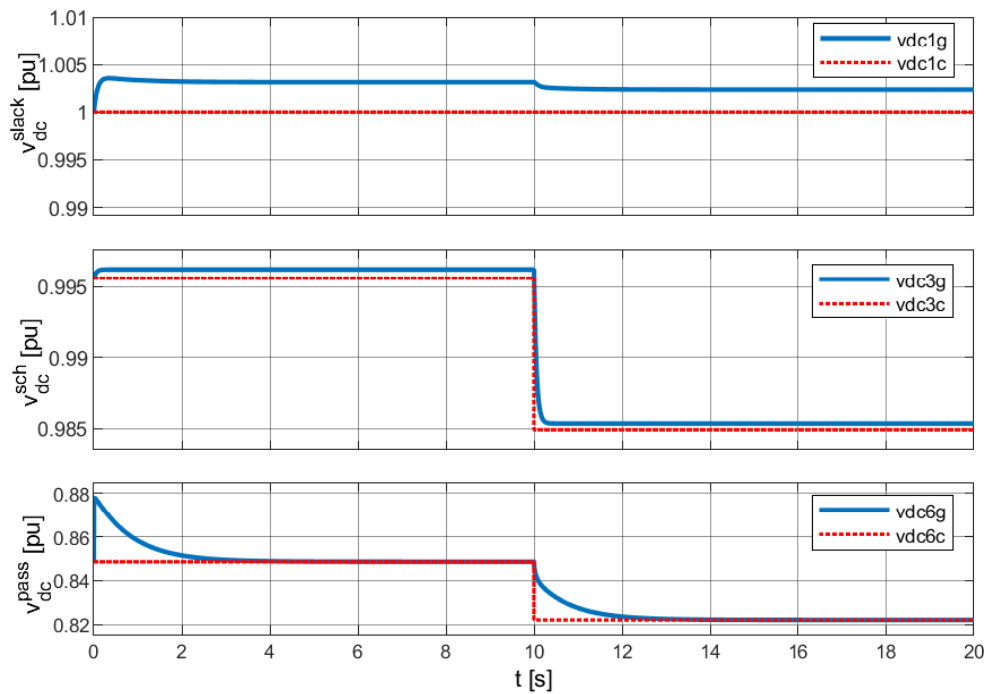


Figura 3.12: Voltaje en terminales de los convertidores VSC .

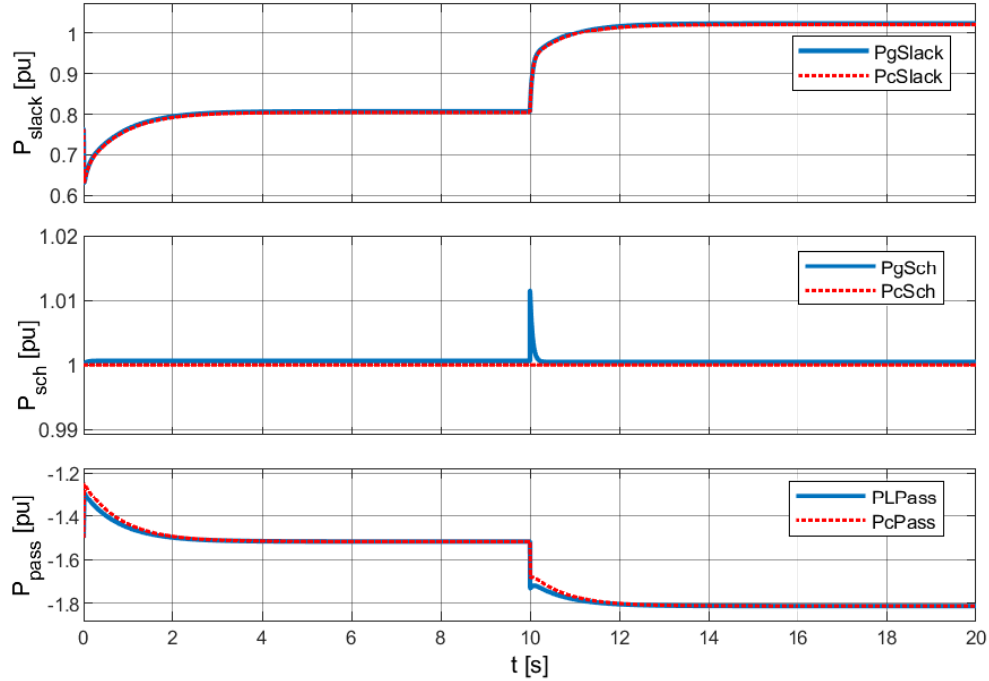


Figura 3.13: Potencia de los convertidores VSC .

Se puede observar en las Figuras 3.12 y 3.13 la regulación de voltaje en las terminales de los convertidores. Donde la señal de referencia es calculada *on-line*, es decir, que va resolviendo los flujos de potencia de la red dentro de la misma simulación. Es importante notar que en $t = 10$ existe un cambio en la potencia demandada en el nodo correspondiente al convertidor V_{pass} , en donde cambian las referencias de voltaje de los convertidores VSC_{sch} y VSC_{pass} y los controladores propuestos son capaces de llevar a los convertidores a los valores deseados, mientras la potencia entregada por el convertidor VSC_{sch} muestra un sobretiro, sin embargo, regresa al valor de potencia deseada. Por otro lado, el VSC_{slack} se encarga de compensar el incremento en la demanda de potencia manteniendo la referencia de voltaje del enlace, en donde se observa un error en estado estacionario menor al 0.5% que permite un funcionamiento adecuado de la red.

Por otro lado, en las Figuras 3.14-3.16 se presenta el comportamiento de los estados

3. DISEÑO DE UN CONTROL DIFUSO PARA REDES VSC-HVDC

de las tres estaciones de conversión VSC . Es posible observar en el VSC_{slack} un buen desempeño en la regulación de las corrientes i_d e i_q que corresponden a los estados x_1^{slack} by x_2^{slack} , mientras que el voltaje muestra un pequeño error, como anteriormente fue mencionado. En el caso del convertidor VSC_{sch} encontramos que existe un error de regulación en estado estacionario menor al 0.4 % en los tres estados donde existe un cambio apenas perceptible gracias a la escala del gráfico. Finalmente, para el VSC_{pass} se tienen transitorios más prolongados presentando errores en estado estacionario cercanos a cero en el caso de la corriente de directa (x_1^{pass}) y el voltaje en terminales (x_3^{pass}), sin embargo, el error en la corriente de cuadratura (x_2^{pass}) es más significativo que en los casos anteriores.

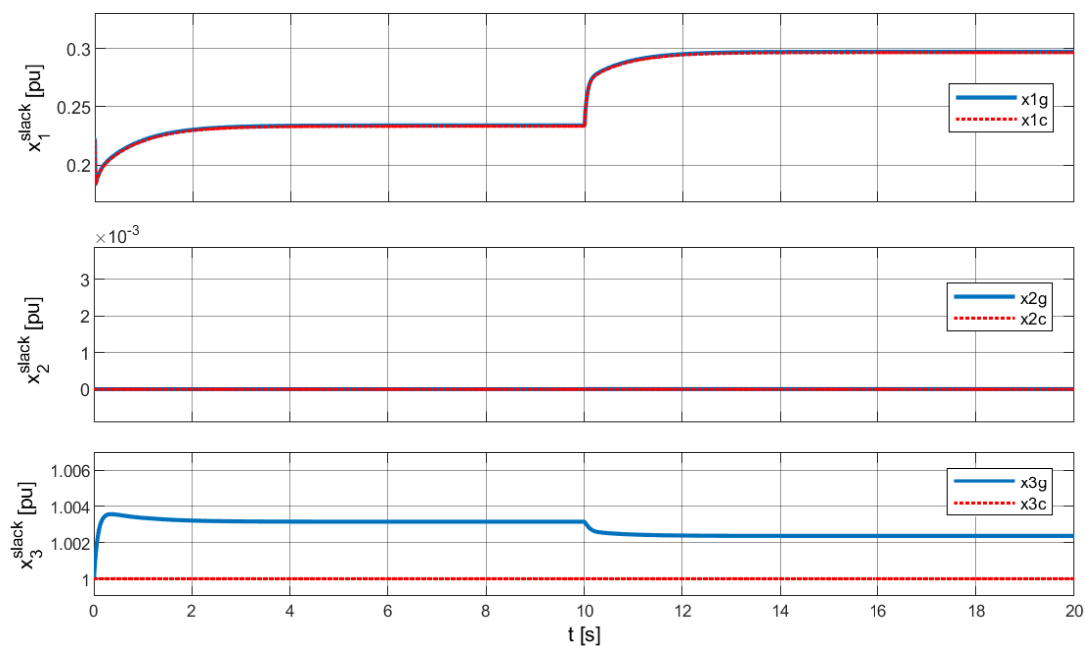


Figura 3.14: Estados del VSC_{slack} .

3.4 Simulación de una red MT VSC-HVDC de tres terminales con control difuso T-S

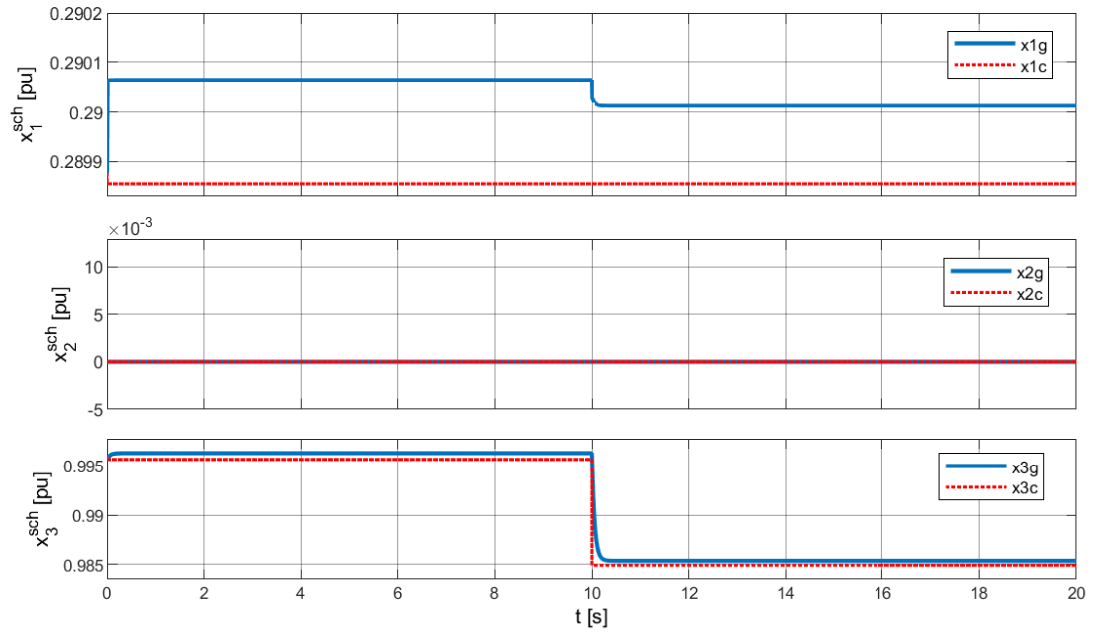


Figura 3.15: Estados del VSC_{sch} .

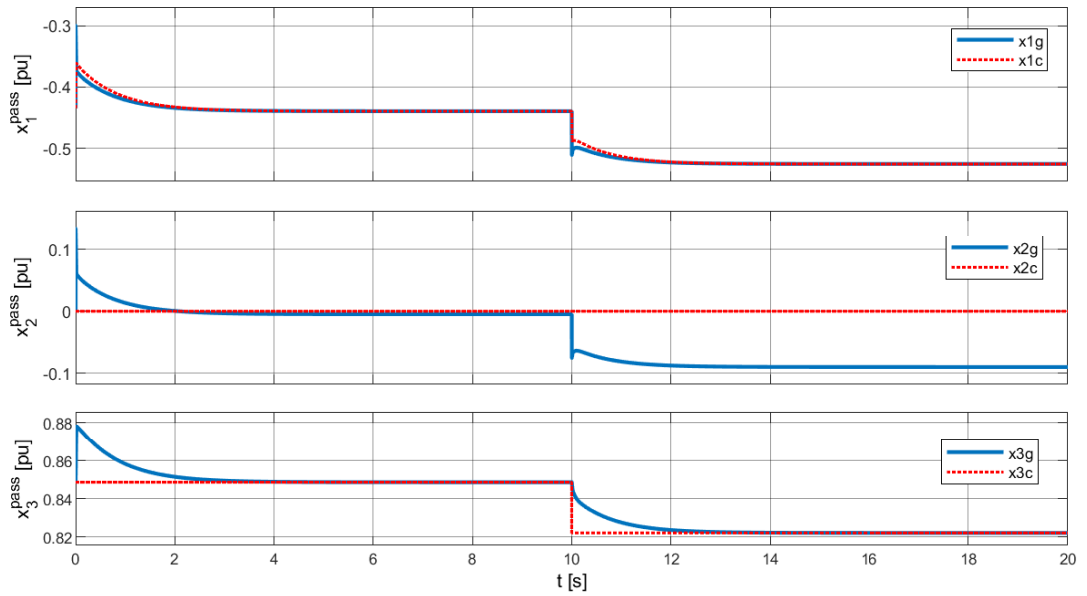


Figura 3.16: Estados del VSC_{pass} .

De acuerdo a las observaciones realizadas sobre el comportamiento de los controladores, es importante resaltar que se han usado dos métodos cuyo principio se basa en la cancelación matemática de las no linealidades del sistema y el seguimiento de las referencias por medio de la estabilización de la dinámica del error, como es el caso del control por linealización *entrada-salida* utilizado en convertidor VSC_{pass} . Por el otro lado, el control utilizado en el VSC_{slack} y el VSC_{sch} parte de la conocida linealización de Taylor donde se calcula una ganancia de lazo cerrado para la retroalimentación de estado que asegura estabilidad local. Mediante el uso de las herramientas del modelo difuso T-S y a partir del *Teorema 1* es posible ampliar la vecindad donde el controlador opera. Así como lo menciona [49], si se toma un sistema dinámico lineal como la función de salida entonces el sistema difuso puede verse como un interpolador no lineal entre R sistemas lineales, lo cual representa una característica realmente útil para los escenarios planteados en las simulaciones.

Conclusiones y trabajo a futuro

En las secciones anteriores se ha presentado el estudio de redes HVDC y de sus componentes, destacando las características no lineales de los dispositivos de conversión de potencia. A pesar de ser una tarea menos sencilla que el diseño de controladores para sistemas lineales, en el desarrollo de este trabajo se pueden encontrar argumentos que justifican el uso del modelo no lineal de un convertidor de potencia y en consecuencia el uso de herramientas de análisis y control no lineales.

Siguiendo la línea planteada a lo largo de esta tesis, se tiene una visión del uso de herramientas de control inteligente, que además de basarse en el conocimiento del sistema y traducir la experiencia del usuario en reglas difusas, también hace uso de recursos matemáticos para apoyar la formalidad de los métodos aplicados a la solución de desigualdades matriciales lineales que permiten obtener una serie de ganancias de retroalimentación que después son utilizadas dentro de una función encargada de generar la señal de control a partir de un proceso de *defuzificación*.

Con base en lo estipulado en los capítulos anteriores, se deducen las siguientes conclusiones:

- El modelo dinámico utilizado lleva a explorar diferentes técnicas de control que a su vez permiten observar los detalles puntuales de los convertidores de potencia VSC y su integración en un red, lo cual, se observa en los resultados numéricos y

simulaciones presentadas en el capítulo anterior.

- Se presentó el diseño y la implementación de un control difuso capaz de regular la potencia a la salida de un convertidor VSC por medio del control de corriente y voltaje, utilizando como variable difusa la corriente de salida del convertidor.
- Utilizando un modelo algebraico diferencial de una red MT VSC-HVDC, se realizó la integración del convertidor con control difuso y donde fue posible observar el desempeño de un convertidor tipo VSC_{slack} , VSC_{sch} y VSC_{pass} , donde se priorizan diferentes objetivos de control para el funcionamiento en conjunto con una etapa de generación de referencias que se encarga de resolver las restricciones algebraicas de la red.

Es importante resaltar una de las aportaciones planteadas al principio de este trabajo, donde se busca incentivar el uso de las herramientas que se han desarrollado en el campo del control inteligente y específicamente en el control difuso.

Por otro lado, también es importante destacar el planteamiento del problema de regulación de potencia en sistemas de transmisión de potencia en corriente directa a niveles de voltaje considerablemente altos. Vale la pena mencionar el área de oportunidad que se encuentra en el estudio de sistemas de potencia, en donde existe una gran atención en el desarrollo de tecnología que permita tener sistemas más robustos y confiables con un enfoque sostenible.

De manera particular, en este trabajo se puntualiza el estudio de controladores locales y descentralizados para las estaciones de conversión de potencia de los enlaces HVDC, que a través de una topología Multiterminal, permiten ampliar el rango de intercambio de potencia entre redes con diferentes características, además de permitir de manera inmediata la inclusión de generación no convencional.

Bajo las características que se han venido mencionando para el estudio de este tipo

de sistemas de transmisión HVDC, se desarrolló el análisis de las restricciones algebraicas y de la dinámica de sus componentes, lo cual se ve reflejado en la representación *algebraica diferencial*. A partir, de ese intercambio de información entre la generación de referencias y la regulación de la potencia por medio del control de la dinámica de los convertidores, es importante mencionar las aportaciones que nos ofrece el esquema difuso que se ha utilizado. La respuesta del controlador se ha mostrado favorable, sin sobrepasos considerables en los estados del sistema, así como la capacidad de soportar variaciones en algunos parámetros, lo que nos permite operar al sistema en una vecindad amplia. Sin embargo, también es importante mencionar que la señal de control llega tener una magnitud considerable, que pudiera afectar el funcionamiento de la etapa de conmutación del convertidor. De igual forma, el proceso de sintonización de las ganancias tiende a ser empírico, lo cual pudiera representar un obstáculo que encontramos de manera común en otro tipo de técnicas y es inherente al control por retroalimentación de estados.

4.1. Trabajo a futuro

De acuerdo a lo que se encuentra en los párrafos anteriores, se tiene la certeza de que se han cumplido los objetivos planteados en el comienzo del documento y se abre un espacio para profundizar en las diferentes aristas del conocimiento que aquí se presenta para una solución particular. Entre ellas, el estudio estrategias de control para la operación de sistemas HVDC tanto a nivel transmisión como a nivel distribución para el despacho óptimo, contingencias en la operación real, lazos externos de compensación o control *droop*, y por el lado del control inteligente, donde se tiene que el conocimiento acumulado sobre un sistemas puede traducirse y crecer con el apoyo de redes neuronales, control experto o sistemas difusos, que además explotan la capacidad de cómputo que tenemos al alcance.

Reducción de Kron

La eliminación de variables es idéntica a la reducción de la red porque conduce a redes equivalentes de orden reducido por la eliminación de nodos que se realiza en cada etapa. Este proceso es importante cuando se analiza un sistema de potencia altamente interconectado y se tiene un interés especial en los voltajes de algunas de las barras del sistema.

Las barras de la red que no están conectadas a una carga externa o a una fuente de generación, tienen una inyección de corriente igual a cero y en muchos casos se puede prescindir del valor explícito de voltaje en esos nodos. Cuando se eliminan en un sentido matemático los nodos que tienen corrientes inyectadas con valor cero se dice que un sistema tiene una *Reducción de Kron* [52].

Por ejemplo, en un sistema de cuatro barras si $I_1 = 0$, las ecuaciones de admitancias de nodo se puede escribir:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

al eliminar el nodo 1, se obtiene:

$$\begin{bmatrix} Y_{11}^{(1)} & Y_{12}^{(1)} & Y_{13}^{(1)} \\ Y_{21}^{(1)} & Y_{22}^{(1)} & Y_{23}^{(1)} \\ Y_{31}^{(1)} & Y_{32}^{(1)} & Y_{33}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

en la que los elementos con superíndice de la matriz de coeficientes reducidos se calculo utilizando el siguiente algoritmo:

$$Y_{jk}^{nueva} = Y_{jk} - \frac{Y_{jp}Y_{pk}}{Y_{pp}}$$

en donde p va ser el nodo que se va a eliminar y j, k toman los valores enteros desde 1 hasta N con la excepción de p ya que la fila y la columna p se eliminan. El subíndice (nueva) distingue los elementos de la barra Y_{barra} nueva de dimensión $(N-1) \times (N-1)$ de los de la Y_{barra} original.

A.1. Reducción de Kron del enlace VSC-HVDC de tres terminales

Partiendo de la matriz de admitancias Y_{bus} del enlace completo:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Y_{21} & Y_{22} & 0 & Y_{24} & Y_{25} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{33} & Y_{34} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & 0 \\ 0 & Y_{52} & 0 & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{65} & Y_{66} \end{bmatrix}$$

Aplicando el algoritmo para eliminar el nodo 2:

$$Y_{jk}^1 = Y_{jk} - \frac{Y_{j2}Y_{2k}}{Y_{22}}$$

Las nuevas admitancias Y

$$\begin{aligned}
 Y_{11}^1 &= Y_{11} - \frac{Y_{12}Y_{21}}{Y_{22}} & Y_{34}^1 &= Y_{34} - \frac{Y_{32}Y_{24}}{Y_{22}} \\
 Y_{13}^1 &= Y_{13} - \frac{Y_{12}Y_{23}}{Y_{22}} & Y_{35}^1 &= Y_{35} - \frac{Y_{32}Y_{25}}{Y_{22}} \\
 Y_{14}^1 &= Y_{14} - \frac{Y_{12}Y_{24}}{Y_{22}} & Y_{36}^1 &= Y_{36} - \frac{Y_{32}Y_{26}}{Y_{22}} \\
 Y_{15}^1 &= Y_{15} - \frac{Y_{12}Y_{25}}{Y_{22}} & Y_{41}^1 &= Y_{41} - \frac{Y_{42}Y_{21}}{Y_{22}} \\
 Y_{16}^1 &= Y_{16} - \frac{Y_{12}Y_{26}}{Y_{22}} & Y_{43}^1 &= Y_{43} - \frac{Y_{42}Y_{23}}{Y_{22}} \\
 Y_{31}^1 &= Y_{31} - \frac{Y_{32}Y_{21}}{Y_{22}} & Y_{44}^1 &= Y_{44} - \frac{Y_{42}Y_{24}}{Y_{22}} \\
 Y_{33}^1 &= Y_{33} - \frac{Y_{32}Y_{23}}{Y_{22}} & Y_{45}^1 &= Y_{45} - \frac{Y_{42}Y_{25}}{Y_{22}} \\
 \\
 Y_{46}^1 &= Y_{46} - \frac{Y_{42}Y_{26}}{Y_{22}} & Y_{61}^1 &= Y_{61} - \frac{Y_{62}Y_{21}}{Y_{22}} \\
 Y_{51}^1 &= Y_{51} - \frac{Y_{52}Y_{21}}{Y_{22}} & Y_{63}^1 &= Y_{63} - \frac{Y_{62}Y_{23}}{Y_{22}} \\
 Y_{53}^1 &= Y_{53} - \frac{Y_{52}Y_{23}}{Y_{22}} & Y_{64}^1 &= Y_{64} - \frac{Y_{62}Y_{24}}{Y_{22}} \\
 Y_{54}^1 &= Y_{54} - \frac{Y_{52}Y_{24}}{Y_{22}} & Y_{65}^1 &= Y_{65} - \frac{Y_{62}Y_{25}}{Y_{22}} \\
 Y_{55}^1 &= Y_{55} - \frac{Y_{52}Y_{25}}{Y_{22}} & Y_{66}^1 &= Y_{66} - \frac{Y_{62}Y_{26}}{Y_{22}} \\
 Y_{56}^1 &= Y_{56} - \frac{Y_{51}Y_{26}}{Y_{22}} & &
 \end{aligned}$$

Obteniendo la nueva matriz de admitancias Y_{bus}^1 , quedaría:

$$Y_{bus}^1 = \begin{bmatrix} Y_{11}^1 & Y_{13}^1 & Y_{14}^1 & Y_{15}^1 & Y_{16}^1 \\ Y_{31}^1 & Y_{33}^1 & Y_{33}^1 & Y_{35}^1 & Y_{36}^1 \\ Y_{41}^1 & Y_{43}^1 & Y_{34}^1 & Y_{45}^1 & Y_{46}^1 \\ Y_{51}^1 & Y_{53}^1 & Y_{35}^1 & Y_{55}^1 & Y_{56}^1 \\ Y_{61}^1 & Y_{63}^1 & Y_{36}^1 & Y_{56}^1 & Y_{66}^1 \end{bmatrix}$$

Aplicando el algoritmo para eliminar el nodo 4:

$$Y_{jk}^2 = Y_{jk}^1 - \frac{Y_{j4}^1 Y_{4k}^1}{Y_{44}^1}$$

A. REDUCCIÓN DE KRON

Calculando las nuevas admitancias serían:

$$\begin{aligned}
 Y_{11}^2 &= Y_{11}^1 - \frac{Y_{14}^1 Y_{41}^1}{Y_{44}^1} & Y_{51}^2 &= Y_{51}^1 - \frac{Y_{54}^1 Y_{41}^1}{Y_{44}^1} \\
 Y_{13}^2 &= Y_{13}^1 - \frac{Y_{14}^1 Y_{43}^1}{Y_{44}^1} & Y_{53}^2 &= Y_{53}^1 - \frac{Y_{54}^1 Y_{43}^1}{Y_{44}^1} \\
 Y_{15}^2 &= Y_{15}^1 - \frac{Y_{14}^1 Y_{45}^1}{Y_{44}^1} & Y_{55}^2 &= Y_{55}^1 - \frac{Y_{54}^1 Y_{45}^1}{Y_{44}^1} \\
 Y_{16}^2 &= Y_{16}^1 - \frac{Y_{14}^1 Y_{46}^1}{Y_{44}^1} & Y_{56}^2 &= Y_{56}^1 - \frac{Y_{54}^1 Y_{46}^1}{Y_{44}^1} \\
 Y_{31}^2 &= Y_{31}^1 - \frac{Y_{34}^1 Y_{41}^1}{Y_{44}^1} & Y_{61}^2 &= Y_{61}^1 - \frac{Y_{64}^1 Y_{41}^1}{Y_{44}^1} \\
 Y_{33}^2 &= Y_{33}^1 - \frac{Y_{34}^1 Y_{43}^1}{Y_{44}^1} & Y_{63}^2 &= Y_{63}^1 - \frac{Y_{64}^1 Y_{43}^1}{Y_{44}^1} \\
 Y_{35}^2 &= Y_{35}^1 - \frac{Y_{34}^1 Y_{45}^1}{Y_{44}^1} & Y_{65}^2 &= Y_{65}^1 - \frac{Y_{64}^1 Y_{45}^1}{Y_{44}^1} \\
 Y_{36}^2 &= Y_{36}^1 - \frac{Y_{34}^1 Y_{46}^1}{Y_{44}^1} & Y_{66}^2 &= Y_{66}^1 - \frac{Y_{64}^1 Y_{46}^1}{Y_{44}^1}
 \end{aligned}$$

Obteniendo tercera matriz de admitancias Y_{bus}^2 , quedaría:

$$Y_{bus}^2 = \begin{bmatrix} Y_{11}^2 & Y_{13}^2 & Y_{14}^2 & Y_{15}^2 \\ Y_{31}^2 & Y_{33}^2 & Y_{33}^2 & Y_{35}^2 \\ Y_{51}^2 & Y_{53}^2 & Y_{54}^2 & Y_{55}^2 \\ Y_{61}^2 & Y_{63}^2 & Y_{65}^2 & Y_{65}^2 \end{bmatrix}$$

Aplicando el algoritmo para eliminar el nodo 5:

$$Y_{jk}^3 = Y_{jk}^2 - \frac{Y_{j5}^2 Y_{5k}^2}{Y_{55}^2}$$

Calculando las nuevas admitancias del enlace ya reducido serían:

$$\begin{aligned}
 Y_{11}^3 &= Y_{11}^2 - \frac{Y_{15}^2 Y_{51}^2}{Y_{55}^2} & Y_{36}^3 &= Y_{36}^2 - \frac{Y_{35}^2 Y_{56}^2}{Y_{55}^2} \\
 Y_{13}^3 &= Y_{13}^2 - \frac{Y_{15}^2 Y_{53}^2}{Y_{55}^2} & Y_{61}^3 &= Y_{61}^2 - \frac{Y_{65}^2 Y_{51}^2}{Y_{55}^2} \\
 Y_{16}^3 &= Y_{16}^2 - \frac{Y_{15}^2 Y_{56}^2}{Y_{55}^2} & Y_{63}^3 &= Y_{63}^2 - \frac{Y_{65}^2 Y_{53}^2}{Y_{55}^2} \\
 Y_{31}^3 &= Y_{31}^2 - \frac{Y_{35}^2 Y_{51}^2}{Y_{55}^2} & Y_{66}^3 &= Y_{66}^2 - \frac{Y_{65}^2 Y_{56}^2}{Y_{55}^2} \\
 Y_{33}^3 &= Y_{33}^2 - \frac{Y_{35}^2 Y_{53}^2}{Y_{55}^2} & &
 \end{aligned}$$

Obteniendo la ultima matriz del enlace reducido Y_{bus}^3 :

$$Y_{bus}^3 = \begin{bmatrix} Y_{11}^3 & Y_{13}^3 & Y_{16}^3 \\ Y_{31}^3 & Y_{33}^3 & Y_{36}^3 \\ Y_{61}^3 & Y_{63}^3 & Y_{66}^3 \end{bmatrix}$$

Flujos de potencia con el método de Newton-Raphson

La solución de flujos de potencia nos permite conocer el intercambio de potencia que hay entre los nodos de la red para un punto de operación dado por los voltajes de los nodos y las impedancias que conectan a los buses, los cuales pueden demandar potencia (bus de carga) o suministrar potencia (bus de generación). El flujo de potencia en corriente alterna para un nodo k está dado por:

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k I_k^* \quad (\text{B.1})$$

mientras que para un régimen en corriente directa queda de la forma:

$$P_{dck} = V_k I_k \quad (\text{B.2})$$

en donde V_k e I_k son el voltaje y corriente del bus.

Las corrientes de la red se obtienen de:

$$[I] = [Y_{BUS}][V] \quad (\text{B.3})$$

donde Y_{BUS} es la matriz de admitancias nodales formada a partir de las impedancias de interconexión de los n nodos de la red. Los elementos de la matriz de admitancias se dividen en dos:

1. Elementos de la diagonal principal: Son la suma de las admitancias que llegan a un nodo y son positivos.
2. Elemento fuera de la diagonal principal: Corresponden a las admitancias que unen a dos nodos y son negativos.

Para encontrar el valor de las variables desconocidas (fasores de voltaje), se utilizan las ecuaciones de balance de potencia para los n nodos de la red.

$$\Delta P_k = P_k^g - P_k^d - P_k^{cal} = 0 \quad (\text{B.4a})$$

$$\Delta Q_k = Q_k^g - Q_k^d - Q_k^{cal} = 0 \quad (\text{B.4b})$$

considerando que en las redes de DC solamente existe transferencia de potencia activa, se utilizará la ecuación (B.4a), donde $k \in [1, \dots, n]$, P_k^g es la potencia generada en el nodo, P_k^d es la potencia demandada por las cargas conectadas en el nodo k y la potencia calculada se obtiene de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_k^{cal} = v_k^2 Y_{kk} + v_k \sum_{m=1}^n v_m Y_{km}, \quad \forall m \neq k \quad (\text{B.5})$$

dado que la ecuación anterior es no lineal, para resolverla se utilizan métodos iterativos como el método Newton-Raphson. Tanto en redes de AC como de DC, el procedimiento consiste en resolver la siguiente ecuación:

$$[\Delta v] = J^{-1}[\text{error}] \quad (\text{B.6})$$

donde $[\Delta v]$ es el vector de incrementos de las variables, que en el caso de redes de corriente directa son los voltajes nodales desconocidos, el vector de error $[\text{error}]$ representa la diferencia del balance de potencia dado entre el valor actual y el valor calculado con el valor de las variables estimadas:

$$[\text{error}] = [P_{actual}] - [P_{calculada}] \quad (\text{B.7})$$

Finalmente, J es la matriz jacobiana de la red, que para el caso de redes de AC la

forma generalizada esta dada como sigue:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P^{cal}}{\partial v} & \frac{\partial P^{cal}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial Q^{cal}}{\partial v} & \frac{\partial Q^{cal}}{\partial \theta} \end{bmatrix} \quad (\text{B.8})$$

y para DC tiene la siguiente forma:

$$J_{dc} = \left[\frac{\partial P^{cal}}{\partial v} \right] \quad (\text{B.9})$$

El proceso continua al actualizar el valor de las variables en cada iteración:

$$[v]^{i+1} = [v]^i + [\Delta v]^i \quad (\text{B.10})$$

y se repetirá hasta que se cumpla la tolerancia especificada (ε): $|[error]^i| \leq \varepsilon$.

Programa para la solución de LMIs

A continuación se muestra el código desarrollado para resolver las LMI's para el control del enlace HVDC de tres terminales.

```

%      Solucion de LMI      %
disp('Declaracion de variables ')
Q=sdpvar(3,3);
v1=sdpvar(2,3);
v2=sdpvar(2,3);
v3=sdpvar(2,3);
disp('Declaracion de las desigualdades ')
In1=[-A1*Q+Q*A1'-v1'*B1'-B1*v1) zeros(3,3)
zeros(3,3) Q];
In2=[-A2*Q+Q*A2'-v2'*B2'-B2*v2) zeros(3,3)
zeros(3,3) Q];
In3=[-A3*Q+Q*A3'-v3'*B3'-B3*v3) zeros(3,3)
zeros(3,3) Q];
In12=[-Q*A1'+A1*Q+Q*A2'+A2*Q-v2'*B1'-v1'*B2'-B1*v2-B2*v1)
zeros(3,3) zeros(3,3) Q];
In13=[-Q*A1'+A1*Q+Q*A3'+A3*Q-v3'*B1'-v1'*B3'-B1*v3-B3*v1)
zeros(3,3) zeros(3,3) Q];

```

C. PROGRAMA PARA LA SOLUCIÓN DE LMIS

```
disp('Conjunto de desigualdades')
F=[In1>/eye(6)*o,In2>/eye(6)*o,In3>/eye(6)*o,In12>/eye(6)*o,
In13>/eye(6)*o,Q>/o>4e-6*eye(3)];

disp('Solucion del conjunto de desigualdades')
solvesdp(F);
Q=double(Q);
v1=double(v1);
v2=double(v2);
v3=double(v3);
P=inv(Q);
eig(P);
disp('Ganancias')
K1ps=v1*P
K2ps=v2*P
K3ps=v3*P
```

Bibliografía

- [1] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee, and J.-W. Jung, “Ac-microgrids versus dc-microgrids with distributed energy resources: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 387–405, 2013. [3](#)
- [2] C. W. Gellings, “A globe spanning super grid,” *IEEE Spectrum*, vol. 52, no. 8, pp. 48–54, 2015. [4](#)
- [3] A. Abbas and P. Lehn, “Pwm based vsc-hvdc systems — a review.,” *2009 IEEE Power Energy Society General Meeting, Power Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE*, pp. 1 – 9, 2009. [4](#)
- [4] M. Barnes, D. Van Hertem, S. P. Teeuwsen, and M. Callavik, “Hvdc systems in smart grids,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2082–2098, 2017. [4](#)
- [5] P. Kundur and N. Balu, *Power System Stability and Control*. EPRI power system engineering series, McGraw-Hill, 1994. [4](#)
- [6] D. Jiang and H. Zheng, “Research status and developing prospect of dc distribution network,” *Dianli Xitong Zidonghua/Automation of Electric Power Systems*, vol. 36, pp. 98–104, 04 2012. [5](#)
- [7] C. Ramírez, *Modelado de redes generales de distribución en corriente directa considerando generación distribuida para estudio de flujos de carga*. Universidad Nacional Autónoma de México, Agosto 2021. [5](#)

- [8] J. Carrasco, L. Franquelo, J. Bialasiewicz, E. Galvan, R. PortilloGuisado, M. Prats, J. Leon, and N. Moreno-Alfonso, “Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1002–1016, 2006. [5](#)
- [9] D. Zonetti, R. Ortega, and A. Benchaib, “Modeling and control of hvdc transmission systems from theory to practice and back,” *Control Engineering Practice*, vol. 45, pp. 133–146, 2015. [5](#), [6](#), [17](#), [22](#)
- [10] M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, and F. Blaabjerg, *Control in power electronics : selected problems*. Academic Press series in engineering, Academic, 2002. [5](#)
- [11] A. Yazdani and R. Iravani, *Voltage-sourced converters in power systems : modeling, control, and applications*. IEEE Press, 2010. [5](#), [7](#)
- [12] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, *Shunt Active Filters*, pp. 109–220. 2007. [5](#)
- [13] R. T. Pinto, S. F. Rodrigues, P. Bauer, and J. Pierik, “Comparison of direct voltage control methods of multi-terminal dc (mtdc) networks through modular dynamic models,” in *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 1–10, 2011. [5](#)
- [14] H. Liang, G. Li, G. Li, P. Li, and M. Yin, “Analysis and design of h controller in vsc hvdc systems,” in *2005 IEEE/PES Transmission Distribution Conference Exposition: Asia and Pacific*, pp. 1–6, 2005. [5](#)
- [15] L. Zhang and H.-P. Nee, “Multivariable feedback design of vsc-hvdc connected to weak ac systems,” in *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, pp. 1–8, 2009. [5](#)
- [16] V. Sood, N. Kandil, R. Patel, and K. Kohorasani, “Comparative evaluation of neural network based and pi current controllers for hvdc transmission,” in *PESC '92 Record. 23rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 553–560 vol.1, 1992. [5](#)

- [17] T.-S. Lee, “Input-output linearization and zero-dynamics control of three-phase ac/dc voltage-source converters,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 1, pp. 11–22, 2003. [5](#), [11](#), [42](#)
- [18] K. Narendra, K. Khorasani, V. Sood, and R. Patel, “Intelligent current controller for an hvdc transmission link,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 1076–1083, 1998. [6](#)
- [19] H. Liang, G. Li, M. Zhou, and C. Zhao, “The implementation of fuzzy adaptive pi controller in vsc-hvdc systems,” in *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, pp. 1–5, 2009. [6](#)
- [20] A. Vafamand, N. Vafamand, R. Razavi-far, J. Zarei, and M. Saif, “Fuzzy generalized predictive control of power converter in dc microgrids with constant power load,” in *2021 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe)*, pp. 1–6, 2021. [6](#)
- [21] N. Nayak, S. K. R. Routray, and P. K. Rout, “Robust fuzzy sliding mode controller design for voltage source converter high-voltage dc based interconnected power system,” *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 421–433, 2014. [7](#)
- [22] S. Hou, Y. Chu, and J. Fei, “Robust intelligent control for a class of power-electronic converters using neuro-fuzzy learning mechanism,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 8, pp. 9441–9452, 2021. [7](#)
- [23] A. Yazdani and R. Iravani, *Two-Level, Three-Phase Voltage-Sourced Converter*, pp. 115–126. 2010. [11](#), [12](#)
- [24] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *VoltageSourced Converters*, pp. 67–101. 2000. [11](#)
- [25] D. Van Hertem, O. Gomis-Bellmunt, and J. Liang, *HVDC technology overview*, pp. 45–78. 2016. [11](#)

- [26] N. Mohan, T. Undeland, and W. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. Power Electronics: Converters, Applications, and Design, John Wiley & Sons, 2003. [12](#)
- [27] M. Eremia, C.-C. Liu, and A.-A. Edris, *VSC-HVDC Transmission*, pp. 125–267. 2016. [12](#), [13](#)
- [28] R. D. Middlebrook and S. Cuk, “A general unified approach to modelling switching-converter power stages,” in *1976 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 18–34, 1976. [14](#)
- [29] R. Ortega, A. Loría, P. J. Nicklasson, and H. Sira-Ramírez, *Modeling of switched DC-to-DC power converters*, pp. 135–180. London: Springer London, 1998. [14](#)
- [30] E. Acha, C. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Pérez, and C. Angeles-Camacho, *FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks*. Wiley, 2004. [14](#)
- [31] C. Angeles-Camacho, E. Acha, O. Tortelli, and C. Fuerte-Esquivel, “Inclusion of a high voltage dc-voltage source converter model in a newton-raphson power flow algorithm,” *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, vol. 150, no. 6, pp. 691–696 – 696, 2003. [14](#)
- [32] X.-P. Zhang, “Multiterminal voltage-sourced converter-based hvdc models for power flow analysis,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 1877–1884, 2004. [14](#)
- [33] E. Acha, B. Kazemtabrizi, and L. M. Castro, “A new vsc-hvdc model for power flows using the newton-raphson method,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 2602–2612, 2013. [14](#)
- [34] E. Acha and L. M. Castro, “A generalized frame of reference for the incorporation of multi-terminal vsc-hvdc systems in power flow solutions,” *Electric Power Systems Research*, vol. 136, pp. 415–424, 2016. [14](#), [21](#)

- [35] L. M. Castro, E. Acha, and C. R. Fuerte-Esquivel, “A novel vsc-hvdc link model for dynamic power system simulations,” *Electric Power Systems Research*, vol. 126, pp. 111–120, 2015. [16](#)
- [36] Y. H. Liu, J. Arrillaga, and N. R. Watson, “Addition of four-quadrant power controllability to multi-level vsc hvdc transmission,” *IET generation, transmission distribution (Print)*, vol. 1, no. 6, pp. 872 – 878, 2007. [16](#)
- [37] Z. Daniele and J. Schiffer, “A tool for stability and power-sharing analysis of a generalized class of droop controllers for high-voltage direct-current transmission systems,” *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, vol. PP, 03 2017. [19](#)
- [38] L. Castro, *Modelling of Multi-terminal VSC-HVDC Links for Power Flows and Dynamic Simulations of AC/DC Power Networks*. 12 2016. [19](#), [25](#), [26](#)
- [39] G. Álvarez, *Modelado de redes eléctricas modernas con enlaces VSC-HVDC para estudios de control automático de frecuencia*. Universidad Nacional Autónoma de México, 08 2020. [19](#)
- [40] A. Yazdani and R. Iravani, *Static Compensator (STATCOM)*, pp. 311–333. 2010. [20](#)
- [41] L. Shen, W. Wang, and M. Barnes, “The influence of mtdc control on dc power flow and ac system dynamic responses,” in *2014 IEEE PES General Meeting — Conference Exposition*, pp. 1–5, 2014. [22](#)
- [42] M. D. Ilic and J. Zaborszky, *Dynamics and control of large electric power systems*. New York ; Chichester : Wiley, 2000. .^A Wiley-Interscience publication.”. [22](#)
- [43] N. Vieyra, P. Maya, and L. M. Castro, “Dynamic state estimation for microgrid structures,” *Electric Power Components and Systems*, vol. 48, no. 3, pp. 320–332, 2020. [22](#)

- [44] M. Ortiz, N. Vieyra, and P. Maya-Ortiz, “An energy storage system for islanded microgrids.,” *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático*, vol. 48, no. 3, pp. 427–432, 2022. [22](#)
- [45] F. Alturki and A. Abdennour, “Neuro-fuzzy control of a steam boiler-turbine unit,” in *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications (Cat. No.99CH36328)*, vol. 2, pp. 1050–1055 vol. 2, 1999. [23](#)
- [46] J. Liu, *Intelligent control design and MATLAB simulation*. 09 2017. [24](#)
- [47] C. Lee, “Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. i,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 20, no. 2, pp. 404–418, 1990. [28](#)
- [48] K. Tanaka and H. O. Wang, *Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach*. USA: John Wiley amp; Sons, Inc., 2002. [28](#)
- [49] K. M. Passino and S. Yurkovich, *Fuzzy Control*. USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1st ed., 1997. [28](#), [29](#), [46](#)
- [50] H. Wang, K. Tanaka, and M. Griffin, “An analytical framework of fuzzy modeling and control of nonlinear systems: stability and design issues,” in *Proceedings of 1995 American Control Conference - ACC'95*, vol. 3, pp. 2272–2276 vol.3, 1995. [30](#)
- [51] J. Lofberg, “Yalmip : a toolbox for modeling and optimization in matlab,” in *2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (IEEE Cat. No.04CH37508)*, pp. 284–289, 2004. [34](#)
- [52] J. Grainger and W. Stevenson, *Análisis de sistemas de potencia*. McGraw-Hill, 2000. [51](#)